
Diplomarbeit

**Voruntersuchungen zur
Verbesserung des Tones bei Feldsportarten durch Nachführung von stark
richtenden Mikrofonsystemen**

Institut für Rundfunktechnik, München
Hochschule der Medien, FH Stuttgart

vorgelegt von: Felix Holderer
am: 13.11.2007

Studiengang: „Audiovisuelle Medien“
Matrikelnummer: 14047

1. Prüfer: Prof. Oliver Curdt, HdM Stuttgart
2. Prüfer: Dipl. Ing. Gerhard Stoll, IRT München

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ort

Datum

Unterschrift

Inhalt

1 Einführung	7
1.1 Die Grundidee und Projektentstehung.....	7
1.2 Zielsetzung des Projekts.....	8
1.3 Themenbereiche dieser Arbeit.....	8
2 Audio in der Sportberichterstattung	10
2.1 Tontechnische Fragestellungen vor der Produktion.....	10
2.1.1 Der Mikrofonplan.....	10
2.1.2 Vorgaben der Veranstalter zur Mikrofonierung.....	11
2.1.3 Der Host Broadcaster.....	12
2.2 Gestalterische Aspekte.....	12
2.2.1 Subjektivierung der Sportberichterstattung.....	13
2.2.2 Aufnahme sportartspezifischer Geräusche.....	14
2.2.3 Feldgeräusche als Vorgabe.....	15
3 Akustische Grundlagen	16
3.1 Punktschallquelle und Kugelwelle.....	16
3.1.1 Das Abstandsgesetz für den Schalldruck.....	17
3.2 Schallfelder.....	18
3.2.1 Freies Schallfeld.....	18
3.2.2 Diffuses Schallfeld.....	18
3.3 Reflexion.....	19
3.3.1 Geometrische Gesetze der Schallausbreitung.....	19
3.3.2 Die Parabelform als Reflektor.....	20
3.4 Schallabsorption.....	22
3.4.1 Absorption durch Publikum und Rasen.....	22
3.5 Meteorologische Einflüsse.....	23
3.5.1 Wind.....	23
3.5.2 Temperatur und Luftfeuchte.....	24

4 Das Schallfeld im Fußballstadion.....	25
4.1 Störschall im Stadion.....	25
4.1.1 Vorstellungsmodell zum Schallfeld.....	28
4.2 Nutzschall - Ermittlung der Schalldruckpegel und Frequenzspektren.....	29
4.2.1 Messung Schalldruckpegel.....	29
4.2.2 Messung Frequenzspektrum.....	30
4.3 Auswahl der Mikrofonstandorte.....	33
4.4 Entfernungen zur Abschätzung des Nutzschalls.....	35
4.4.1 Standort „Hauptkamera“	36
4.4.2 Standort „Seitenlinie“	40
4.5 Pegelverhältnisse am Mikrofonstandort.....	41
4.5.1 Störpegel.....	42
4.5.2 Nutzpegel.....	42
4.5.3 Bedämpfung durch Luft.....	44
4.6 Anforderungen an das Mikrofonsystem.....	45
5 Mikrofontheorie.....	47
5.1 Empfängerprinzipien.....	47
5.1.1 Druckempfänger.....	47
5.1.2 Druckgradientenempfänger.....	47
5.2 Richtwirkung von Mikrofonen.....	48
5.2.1 Richtcharakteristik.....	48
5.2.2 Richtwirkung von Druckmikrofonen bei hohen Frequenzen.....	49
5.2.3 Laufzeitglieder.....	50
5.2.4 Richtwirkung durch ein Mikrofonarray.....	50
5.3 Das Bündelungsmaß.....	52
6 Mikrofonsysteme mit hoher Richtwirkung.....	54
6.1 Das Richtrohrmikrofon.....	54
6.1.1 Funktionsweise.....	54
6.1.2 Marktübersicht und Tauglichkeit für das Projekt.....	55

6.2 Das „Super Shotgun“ Audio Technica 895.....	56
6.2.1 Funktionsweise.....	56
6.2.2 Einsatzgebiete.....	57
6.3 Das „Parabilmikrofon“.....	58
6.3.1 Verstärkungseigenschaften des Parabolreflektors.....	58
6.3.2 Klangfärbungen und Frequenzeinbrüche.....	61
6.3.3 Einsatzgebiete.....	63
6.3.4 Anwendung auf das Projekt.....	64
6.4 „Audioscope“ der Firma „Squarehead“.....	65
7 Mikrofonmessung.....	68
7.1 Auswahl der Mikrofone.....	68
7.2 Zusammenfügen des „Parabilmikrofons“.....	68
7.2.1 Optische und akustische Fokussierung.....	69
7.2.2 Modifikationen.....	72
7.3 Messaufbauten und Messsysteme.....	73
7.3.1 Der reflexionsarme Raum.....	73
7.3.2 Abstand und Schallausbreitung.....	73
7.3.3 Durchführung der Messungen.....	75
7.4 Messergebnisse und deren Interpretation.....	76
7.4.1 Richtwirkung „AT895“.....	76
7.4.2 Rauschverhalten „AT895“.....	78
7.4.3 Richtwirkung „Parabilmikrofon“.....	80
7.4.4 Rauschverhalten „Parabilmikrofon“.....	83
7.4.5 Vergleich der Bündelungsmaße.....	83
7.4.6 Eignung für das Projekt.....	84
8 Praxistest des „Parabilmikrofons“.....	86
8.1 Bedingungen des Tests.....	86
8.2 Klangeindruck.....	87

9 Signalbearbeitung beim „Parabolkmikrofon“	90
9.1 Entzerrung des Mikrofonsignals.....	90
9.2 Ausblick: Frequenzgangkompensation.....	93
10 Die Mikrofon-Nachführung.....	97
10.1 Die Steuerungsdaten.....	97
10.2 Der Stellmotor.....	98
10.2.1 Winkelgeschwindigkeit und Entfernung.....	99
11 Ausblick und Resümee.....	102
12 Anhang.....	104
Anhang A: Schalldruckpegel Nutzschall.....	104
Anhang B: Frequenz- und Zeitverlauf Nutzschall.....	105
Kugelmikrofon „KM83i“, 1 m.....	105
Vergleich von „Parabolkmikrofon“ mit „KM83i“, 15 m.....	107
Anhang C: Bereich der Hauptkamera (FIFA-Empfehlung).....	109
Anhang D: Übersicht Richtrohre.....	110
Anhang E: Frequenzgänge „Parabolkmikrofon“ von 0° bis 45°	112
13 Buchverzeichnis, alphabetisch.....	114
14 Bildverzeichnis.....	118

1 Einführung

Ton in der Sportberichterstattung ist ein Thema, welches in der jüngsten Vergangenheit zunehmend an Wichtigkeit gewinnt. Die Programmveranstalter und Produktionsfirmen entdecken die Möglichkeiten, welche eine hochwertig und bewusst gestaltete Tonspur in sich birgt. Die Kraft und Intensität einer „guten Mischung“ kann jeder Kinogänger bestätigen. So wird im Spielfilmbereich viel Wert auf eine Tongestaltung gelegt, welche die erzählerische Aussage unterstützt.

Der zu begrüßende Wandel hin zu hochwertigerem Ton im Sportbereich macht seit der Ausstrahlung von großen, internationalen Sportveranstaltungen im High-Definition-Television-Standard¹ merkliche Fortschritte. Der Qualitätssprung auf der Bildseite verlangt nach einer höheren Tonqualität, „High-Definition-Audio“ sozusagen. Die nachlässige Behandlung des Fernsehtons als reiner Übermittler von Fakten verschwindet zugunsten einer Tonspur, welche die Emotionen eines Wettkampfes zu „transportieren“ versucht.

Neue Möglichkeiten der Übertragung und Kompression von Mehrkanalton fordern neue Wege in der Aufnahme der Klangereignisse eines Sportevents zu gehen. Das Potential, welches die Übertragungstrecke sowie hochwertige Wiedergabegeräte bieten, soll durch eine optimale Produktion ausgeschöpft werden.

1.1 Die Grundidee und Projektentstehung

Während der im Jahre 2005 in Österreich ausgetragenen Eishockeyweltmeisterschaft versuchte der ORF² als zuständiger Sender, die Spielgeräusche von der Eisfläche sehr dicht zu mikrofonieren.³ Dies realisierte man mittels von der Decke des Eisstadions abgehängten Mikrofonen. Die Mikrofone befanden sich ca. 6 Meter über dem Eis. Die so aufgenommenen Spielgeräusche fanden in einer 5.1-Mischung Verwendung.

Der Verfasser konnte sich einen Höreindruck von der Wirkung dieser Aufnahme verschaffen und war beeindruckt. Man fühlt sich durch den „direkten“ Ton stark ins Spielgeschehen involviert. Die Wahrnehmung von der Geschwindigkeit dieser

¹ HD-TV: Gesteigerte Bildauflösung von bis zu 1920*1080 gegenüber 720*576 bei Standard-TV

² ORF = Österreichischer Rundfunk

³ Beim Viertelfinale Tschechien - USA

Sportart wird so erst spürbar. Das Bild erhält eine weitere Dimension, die man nicht mehr missen möchte.

Diese „experimentelle Mikrofonierung“ des ORF war der wichtigste Ausgangspunkt der hier vorliegenden Arbeit. Die Chancen welche, gerade in Verbindung mit Mehrkanalton, in der Verwendung von Feldgeräuschen liegen, wurden deutlich hörbar.

1.2 Zielsetzung des Projekts

Ziel des Projekts ist es, ein Mikrofonssystem zu entwickeln, welches die Spielgeräusche bei Feldsportarten möglichst selektiv erfassen kann.

Die hohe Richtwirkung soll neben einem sehr schmalen Aufnahmewinkel der jeweiligen Mikrofone durch die dynamische, automatisierte Verfolgung des Schallereignisses realisiert werden. Der Mikrofonbereich höchster Empfindlichkeit wird also der Schallquelle nachbewegt.

Die Daten für diese Verfolgung sollen von der Bildseite gewonnen werden, genauer aus Schwenk- und Neigedaten sowie Objektivparametern der Kameras. Denn die Kombination dieser Informationen gibt Auskunft über den momentanen Aufenthaltsort des von der Kamera abgelenkten Objekts. Als so genannte „Metadaten“ können sie in modernen Videoformaten transportiert und durch ein geeignetes Steuerungssystem ausgelesen werden. Da das System die „Bildbezogenheit“ des Tons garantieren soll, bewegt sich der Aufnahmebereich des Mikrofonsystems daraufhin an die durch die „Metadaten“ vorgegebene Stelle des Spielfeldes.

1.3 Themenbereiche dieser Arbeit

Da das Projekt noch ganz am Anfang steht, kann diese Arbeit nur einen Teilbereich der für die zuvor beschriebene Zielsetzung notwendigen Aufgabenstellungen ergründen.

Daher konzentriert sich diese schriftliche Ausarbeitung auf die Aufnahmetechnik zur Übertragung der Feldgeräusche bei Fußball. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf

Voruntersuchungen zur Ermittlung der anzutreffenden akustischen Verhältnisse. Ebenso werden erste akustische Messungen von Mikrofonen unter Berücksichtigung des geplanten Verwendungszwecks durchgeführt.

Aus entwicklungstechnischer Sicht bietet sich Fußball aufgrund seiner akustisch schwierigen Verhältnisse an. Die Umgebungsbedingungen bei Fußballspielen sind durch die großen räumlichen Ausdehnungen des Spielfeldes und des Spielgeschehens kompliziert. Näher als bis zur Seitenlinie kommt man nicht an die Spieler heran. Zudem setzen sich die Feldgeräusche, wie später noch näher gezeigt, kaum gegen den „Störschall“ der Stadionbesucher durch. Nicht zu vergessen sind auch Wettereinflüsse wie Wind und Regen. Sollte das System in einer solchen Umgebung funktionieren, scheint eine Modifikation für weitere Sportarten relativ unkompliziert.

Die große Herausforderung dieser Ausarbeitung liegt also darin, trotz der weiten Entfernungen eines Fußballstadions und des enormen Störschallpegels, eine Methode zu finden, die Feldgeräusche in einer höheren Qualität als bisher aufzunehmen und dem Mischpult zuzuführen.

2 Audio in der Sportberichterstattung

Zunächst soll der Blick auf tonspezifische Fragestellungen einer Fernsehproduktion gelenkt werden.

Nach Veranschaulichung von Elementen der momentanen Produktionspraxis nähert sich der Autor aus tongestalterischer Sicht der Thematik des „Spielfeldtones“.

2.1 Tontechnische Fragestellungen vor der Produktion

Hier soll kurz verdeutlicht werden, unter welchen organisatorischen und planerischen Begebenheiten über die Verwendung eines Mikrofons entschieden wird. Dies geschieht mit dem Ziel, dass zukünftige System optimal auf die bestehenden Umstände abzustimmen.

2.1.1 Der Mikrofonplan

Die Wahl und Positionierung der Mikrofone passiert in der Planungsphase.⁴ Hierzu wird der so genannte „Mikrofonplan“ erstellt. Er ist Hauptbestandteil der Audioplanungen. Der Mikrofonplan gibt Auskunft über verwendete Mikrofontypen und deren jeweilige Anzahl, die Schallquelle, welche diese aufnehmen sollen, sowie deren Standort. Des Weiteren enthält er Informationen über das zu produzierende Tonformat, also Stereo oder Surround. Erarbeitet wird er nach Kenntnis der akustischen Verhältnisse am Austragungsort.⁵

Grundsätzlich ist es empfehlenswert, die angestrebte Umsetzung mit möglichst wenigen Mikrofonen zu erreichen. So können Auslöschungen in der Signalsumme, die aufgrund ungünstiger Phasenbeziehungen zwischen mehreren Signalen entstehen, vermieden werden. Zudem wird durch jedes zusätzliche Mikrofon auch die Aufnahme von Störschall erhöht.⁶

Das ZDF beispielsweise plant für die Abnahme der Fußball-Feldgeräusche bei DFB-Pokalspielen oder Länderspielen mit folgenden Mikrofonpositionen: 2 Mikrofone hinter Tor A, 2 Positionen am 16-Meter-Raum A, 2 Positionen an der Mittellinie, 2 mal am 16-Meter-Raum B und 2 mal hinter Tor B. Es sind immer 2 Mikrofone pro Position

⁴ Vgl. Owens, S. 127

⁵ Vgl. Baxter, S. 25

⁶ Vgl. Owens, S. 75

notwendig, da beide Seiten des Fußballfeldes mikrofoniert werden. Die Mikrofone befinden sich so nahe wie möglich am Spielfeldrand.⁷

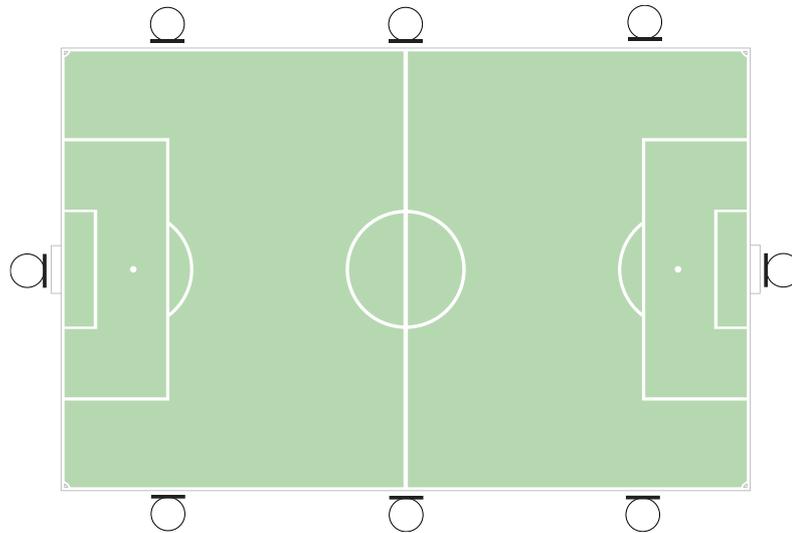


Bild 1. Beispiel eines Mikrofonplans für die Aufnahme der Feldgeräusche. Diese Konfiguration kam bei der Eröffnung der „Allianz Arena“ zum Einsatz, welche im ZDF übertragen wurde.

2.1.2 Vorgaben der Veranstalter zur Mikrofonierung

Zu beachten bei der Planung von Mikrofonstandorten sind die Vorgaben der Veranstalter bzw. Verbände. Mikrofone, welche nahe am Geschehen sein sollen, müssen vom zuständigen Sportverband genehmigt werden.⁸

Beispielsweise sind bei der Übertragung von Tischtennis Miniaturmikrofone an der Platte befestigt. Diese müssen zuvor vom Verband auf ihre Störeinflüsse das Spiel betreffend untersucht werden. Weiteres Beispiel sind die Befestigung von Mikrofonen an Turngeräten oder anderen Sportutensilien. Daher wird der Mikrofonplan des Broadcasters dem Sportverband oder Veranstalter vorgelegt, der ihn auf seine Richtlinien hin überprüft.

Für die Fußball-Bundesliga gibt es von der DFL⁹ so genannte „Medienrichtlinien für Fernsehproduktionen“. Bestandteil dieser ist ebenfalls ein Mikrofonierungsplan, in dem bestimmte, „genehmigte“ Mikrofonstandorte vorgeschlagen werden.¹⁰

⁷ Informationen von Florian Rathgeber, Toningenieur ZDF, 13.4.2007

⁸ Vgl. Baxter, S. 176

⁹ DFL = „Deutsche Fußball Liga“, Vermarktungsorganisation der Bundesliga

¹⁰ Vgl. DFL, Durchführungsbestimmungen, S. 4

2.1.3 Der Host Broadcaster

Bei mehrtägigen, internationalen Sportevents produziert der „Host Broadcaster“ (HB) Video und Audio für die übertragenden Sender. Selbige werden in einem solchen Fall als „Rechteinhaber“ bezeichnet.

Für eine derartige Herangehensweise sprechen hauptsächlich organisatorische Gründe. Denn so muss nicht jeder übertragende Sender seine eigene Technik am Veranstaltungsort installieren. Dies übernimmt der HB. Er übergibt den Rundfunkanstalten eine „Rohfassung“ des später gesendeten Signals. Diese „Rohfassung“ wird als „Basic International Feed“ bezeichnet.

Auf der Tonseite erhalten die Rundfunkanstalten so genanntes „Natural Audio“. Dies bedeutet eine Mischung mit Atmo sowie sportartspezifischen Feldgeräuschen. Das Einfügen eines Kommentars sowie eventueller Moderationen ist Aufgabe des Rechteinhabers. Somit übernimmt der HB auch die Platzierung der Mikrofone und die Gestaltung der Tonspur.¹¹

„Sportcast“ ist in der Spielzeit 2007 / 2008 als HB der Bundesliga verantwortlich für die Produktion des TV-Basissignals aller Spiele der Fußball-Bundesliga sowie der 2. Fußball-Bundesliga. Das erzeugte Signal wird an die nationalen Pay-TV und Free-TV Sender geliefert. Pro Spieltag werden 4 Live-Spiele angeboten, sowohl mit englischem als auch spanischem Kommentar. Die Produktion findet im HD-Video-Standard statt.¹²

2.2 Gestalterische Aspekte

Dieses Kapitel befasst sich zunächst mit der momentanen Gestaltung der auditiven Inhalte bei Sportberichterstattungen, speziell im Fußball.

Besteht Bedarf an einem mit der angestrebten technischen Entwicklung verbundenen, neuen Gestaltungsansatz? Intensiviert die akustische Wahrnehmbarkeit des Spielgeschehens tatsächlich eine Sportübertragung?

Diese Fragen gilt es zu klären, denn das neue System soll aus der gestalterischen Forderung nach „direkteren“ Feldgeräuschen seine Berechtigung finden.

¹¹ Vgl. Owens / Baxter

¹² Vgl. www.sportcast.de, 12.9.2007

2.2.1 Subjektivierung der Sportberichterstattung

Derzeit befindet sich der Fernsehzuschauer bei Fußballausstrahlungen „tonperspektivisch“ auf der Tribüne des Stadions. Zu dieser Feststellung veranlasste die Analyse von im Fernsehen gesendeten Fußballspielen.

So ist eine „Tonästhetik“ wirksam, die ihr Ziel in der Abbildung der Stadionatmosphäre sieht. Zweifellos ist die „Atmo“ ein wichtiger Punkt für eine gelungene Tonproduktion. Sie ist entscheidend für das Erzeugen einer „Grundstimmung“.

Betrachtet man jedoch die „Bildsprache“, so ist es Ziel der Programmgestalter, dass sich der Fernsehzuschauer in die Rolle des Sportlers hineinzusetzen vermag und dadurch den Wettkampf „unmittelbar“ miterlebt. Er soll sich als „unsichtbarer“ Beobachter auf dem Feld fühlen können. Denn die Sportberichterstattung versucht zu „personalisieren“. Auf diese Weise soll dem Zuschauer die Emotion der Sportart nahegebracht werden.¹³

Immer wieder werden neue Kamerapositionen und Perspektiven eingeführt. Ziel ist meist, ein hohes Maß an „Unmittelbarkeit“ und „Subjektivität“ für den Zuschauer herzustellen. Beispiel sind an dieser Stelle die so genannten POV-Kameras¹⁴, welche im Cockpit eines Rennwagens oder am Helm eines Fußballspielers oder Fallschirmspringers angebracht sind. Den selben Effekt erzeugt die neben einem Skispringer „herfliegende“ Seilkamera. Auch die Unterwasserkamera bei Schwimmwettbewerben („Mobycom“¹⁵) ist Mittel zur Herstellung geringer Distanz zum Sportler.

Ein typischer bildgestalterischer Ansatz bei Fußballspielen ist die dynamisch wirkende „Steadicam“-Fahrt, die oft bei Eckbällen eingesetzt wird. Auch die Miniaturkamera im Tornetzwinkel soll eine Steigerung des Fernseherlebnisses beim Zuschauer bewirken.

Sucht man nach der auditiven Entsprechung zum visuellen Gestaltungsansatz, stellt sich schnell Ernüchterung ein. Bei genauerer Betrachtung ist es auffallend, dass die im Fußball zur „Spieltonabnahme“ verwendeten Mikrofone nicht die in den Bildern wiedergegebene „Perspektive“ vermitteln. Gerade bei Nahaufnahmen von Aktionen, die sich eher im Mittelfeld ereignen, erinnert die Ästhetik eher an einen „Stummfilm“.

¹³ Vgl. Owens, S. 112

¹⁴ POV = „Point of View“

¹⁵ Vgl. Owens S. 51

Die dominanten Zuschauergeräusche verhindern eine Tonspur, welche dem Zuschauer auch die Feldgeräusche nahe bringt.

2.2.2 Aufnahme sportartspezifischer Geräusche

Für ein intensives Erleben einer Fernsehsportübertragung sind nicht nur die Bilder von sich verausgabenden Athleten wichtig. Eine große Rolle spielt auch der zum Bild ausgestrahlte Ton.

Feldtöne tendieren durch ihre geringen Schallpegel dazu, von den lauterem Umgebungsgeräuschen maskiert zu werden. Durch sehr nahe Mikrofonierung an der gewünschten Schallquelle wird dem Toningenieur ermöglicht, die Feldgeräusche in den Vordergrund zu bringen. Diese Technik kann einer Mischung eine starke Intensität verleihen.¹⁶

So gibt es Beispiele in der Sportübertragung die sich, der Bildgestaltung entsprechend, eine stärkere Betonung der sportartspezifischen Feldgeräusche zum Ziel setzen.

Sehr innovativ sind beispielsweise die Übertragungen der amerikanischen Sender von den Spielen der „National Football League“ (NFL). Zur Tonaufnahme der Spielgeräusche kommen „Parabolic Microphones“ („Parabilmikrofone“) zum Einsatz. Diese werden von „Operateuren“ dem Spielgeschehen nachbewegt.

Weiteres Beispiel ist das Springreiten, bei welchem Mikrofone neben den Hindernissen, für die Kameras nicht sichtbar, „versteckt“ werden um den Ton des Absprungs, der Landung sowie das „Schnauben“ des Pferdes hörbar zu machen.

Andere Versuche, durch den Ton eine größere Identifizierung des Zuschauers mit den Sportlern zu erreichen, sind z.B. das „Anpfiffmikrofon“ oder die Übertragungen der strategischen Schachzüge des Trainers. Auch das Senden des „Boxenfunks“ bei Autorennen vermittelt dem Zuschauer eine gesteigerte „Zugehörigkeit“ sowie ein verstärktes „Miterleben“ des Betrachteten.

Bei einigen Sportarten können die gewünschten Schallquellen räumlich näher mikrofoniert werden.

So spielt sich beim Basketball ein Großteil der Aktionen direkt unter dem Korb ab, der umfangreich mit Mikrofonen bestückt werden kann. Das „Quietschen“ der

¹⁶ Vgl. Owens, S. 74

Schuhsohlen auf dem Parkett gehört für den Zuschauer schon zur „Erwartungshaltung“.

Bei der Übertragung eines Boxkampfes besteht beispielsweise die Möglichkeit, Mikrofone von der Decke abzuhängen um auf diese Weise nahe an den Sportlern zu sein und gleichzeitig die unerwünschten Publikumsgeräusche zu bedämpfen.

Beispielhaft zu nennen sind hier auch Tennis und Volleyball. Insbesondere beim Tennis bestehen durch die „ruhigen“ Zuschauer im Tennisstadion gute Voraussetzungen zur Aufnahme der Spielgeräusche. Von Vorteil sind auch die „kompakten“ räumlichen Ausdehnungen des Tennisfeldes. Die hohe Präsenz der Feldgeräusche erzeugt eine starke Intensität.

Beim Volleyball bietet sich die Möglichkeit der nahen Mikrofonierung am Netz. Hierdurch sind sogar die Stimmen einzelner Sportler auszumachen. Dies erzeugt eine sehr „persönliche“ Wahrnehmung. Man fühlt sich dem Athleten nahe.

Die „sportspezifischen“ Geräusche und deren Einbindung in den Mix orientieren sich an der visuellen Vorgabe der Kamera.¹⁷

2.2.3 Feldgeräusche als Vorgabe

In den „Produktionsrichtlinien“ der Sportverbände ist es heute vielfach Ziel, eine ausgeprägte Übertragung der Feldgeräusche zu gewährleisten. Hintergrund ist die geforderte Identifikation des Fernsehzuschauers mit der Sportart.

So ist es auch Ziel von „Sportcast“, dem Host Broadcaster der Bundesliga, „die Faszination Fußball am Bildschirm hautnah spürbar“ werden zu lassen.¹⁸

Der „Internationale Basketballverband“ (FIBA) verlangt ausdrücklich Mikrofone nahe am Spielfeld, um die bestmögliche Aufnahme der Spielgeräusche zu garantieren. Sogar von der Decke abgehängte Mikrofone werden erwähnt.¹⁹

Der „Audio Production Plan“ der Winterolympiade 2002 in Salt Lake City beschreibt für Aufnahme und Mischung der Eishockeyspiele: „Die natürlichen, von den wettkämpfenden Sportlern während des Spiels erzeugten Geräusche, sind integraler Bestandteil der Fernsehübertragung.“²⁰

¹⁷ Vgl. Owens, S. 66

¹⁸ Vgl. www.sportcast.de, 12.9.2007

¹⁹ Vgl. FIBA, TV Manual, S.29

²⁰ Vgl. Owens, S. 191

3 Akustische Grundlagen

Die für die Arbeit interessanten Teilgebiete der Akustik sind Thema dieses Abschnitts. Die Auswahl der dargestellten Bereiche erfolgt stets vor dem Hintergrund der noch folgenden Kapitel. Die Grundlagen wollen eine Sensibilität für die Problematik des Projekts schaffen.

3.1 Punktschallquelle und Kugelwelle

Form und Abmessungen eines Schallsenders bestimmen über gerichtete bzw. ungerichtete Schallabstrahlung und damit über die sich ausbreitende Wellenart. Ist die Schallquelle im Vergleich zur abgestrahlten Wellenlänge in ihren Abmessungen klein, so breitet sich die Welle in konzentrischen Kreisen aus.²¹ Ein solcher Schallsender kann als Punktschallquelle angesehen werden.²²

Des Weiteren kann eine Schallquelle, vom Standpunkt des Empfängers, als Punktschallquelle betrachtet werden, wenn ihre Abmessungen klein im Vergleich zum Abstand zwischen Quelle und Empfänger sind.²³

Die meisten technischen und natürlichen Schallquellen emittieren Kugelwellen.²⁴ Beispielsweise darf ein Lautsprecher, solange seine Abmessungen klein im Vergleich zur abgestrahlten Wellenlänge sind, tatsächlich als Kugelstrahler betrachtet werden.²⁵

Die sich auf Kugelschalen ausbreitenden Wellenfronten nähern sich mit zunehmendem Abstand von der Quelle quasiebenen Flächen. Für ein betrachtetes Flächenelement ergeben sich dann nahezu ebene Wellenfronten. Dies gilt bei Erfüllung der Bedingung Wellenlänge $\lambda < r$ (Entfernung von Sender zu Empfänger).²⁶

Für unsere weiteren Betrachtungen spielen „angenäherte Punktschallquelle“ und „ebene Wellenfront“ eine bedeutende Rolle.

²¹ Vgl. Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik, S. 2

²² Vgl. ebd., S. 10

²³ Vgl. DEGA, S. 57

²⁴ Vgl. ebd., S. 20

²⁵ Vgl. Boye, S. 156

²⁶ Vgl. DEGA, S. 20

3.1.1 Das Abstandsgesetz für den Schalldruck

Bei der Kugelwelle verteilt sich die abgestrahlte Schallleistung P mit wachsender Entfernung auf eine immer größer werdende Kugelfläche A . Die Schallintensität I ist hierbei diejenige Leistung, welche durch eine Fläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung hindurchströmt.²⁷

Eine Verdopplung der Entfernung r bedeutet bei kugelförmiger Ausbreitung eine Verringerung der Schallintensität pro betrachtetem Flächenausschnitt auf 1/4 der Intensität, welche vor der Vergrößerung der Entfernung für die gleiche Fläche gültig war. Zwischen Schallintensität I und Schalldruck p besteht der Zusammenhang:

$$I \sim p^2$$

Daher verringert sich der Schalldruck mit zunehmendem Abstand von der Quelle.

Dieser Umstand ist für die akustischen Betrachtungen ([siehe: 4.5](#)) von grundlegender Bedeutung.

Denn das verwendete Mikrofon reagiert auf Änderungen des Schalldrucks. Das sich so ergebende Abstandsgesetz, oder 1/r-Gesetz, beschreibt den umgekehrt proportionalen Zusammenhang zwischen Entfernung r und Schalldruck p :

$$I \sim p^2 \sim \frac{1}{r^2} \quad \Rightarrow \quad p \sim \frac{1}{r}$$

Mit folgender Gleichung lässt sich die Schalldruckpegeländerung ΔL_p zwischen den beiden Entfernungen r_1 und r_2 als dB-Wert ermitteln:

$$\Delta L_p = 20 \cdot \lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Nach dem Abstandsgesetz verringert sich der Schalldruckpegel einer Punktschallquelle im Freifeld um 6 dB ($= \Delta L_p$) mit Verdopplung der Entfernung r .

Die Schallintensität und somit auch der Schalldruckpegel nehmen bei ungehinderter Ausbreitung auch in einem verlustlosen Medium mit zunehmender Entfernung stetig ab. Zur Unterscheidung von zusätzlichen Pegelabnahmen durch Verluste spricht man auch von „geometrisch bedingter Pegelabnahme“.²⁸

²⁷ Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 9

²⁸ Vgl. Heckl, S. 441

3.2 Schallfelder

Einen mit Luft erfüllten Raum, in dem sich Schallwellen ausbreiten, nennt man Schallfeld. Die Struktur eines Schallfeldes wird durch die örtliche und zeitliche Verteilung des Schalldrucks und der Schallschnelle angegeben. Dies sind die Schallfeldgrößen.²⁹ Als Schalldruck bezeichnet man die durch die Schwingungen der Schallquelle im Ausbreitungsmedium hervorgerufenen Druckschwankungen.³⁰ Die Geschwindigkeit der sich bewegenden Luftteilchen um ihre Ruhelage heißt Schallschnelle.³¹

Das Schallfeld in einem Raum wird von der Art und Beschaffenheit seiner Begrenzungsflächen bestimmt.³²

3.2.1 Freies Schallfeld

Ein freies Schallfeld findet sich vor allem in Schallquellennähe. Dort wird die Schallausbreitung nicht durch Reflexionen, Abschattungen, Absorption oder Ähnliches gestört.³³ Wir haben es daher im Prinzip ausschließlich mit dem direkt abgestrahlten Schall zu tun.³⁴ Dieser erreicht den Empfänger auf direktem, ungehindertem Wege. Der Direktschall trifft beim Empfänger immer vor den diffusen Schallrückwürfen derselben Schallquelle ein.³⁵

Für das Verhalten der Feldgeräusche können aus noch näher zu betrachtenden Gründen „Freifeldbedingungen“ angenommen werden.

3.2.2 Diffuses Schallfeld

An einem Punkt herrscht ein diffuses Schallfeld vor, wenn die das Feld beschreibenden Schallwellen mehr oder weniger gleichzeitig aus allen Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit und Stärke eintreffen.³⁶ Der Diffusschall ist im Allgemeinen etwa gleichmäßig über den ganzen Raum verteilt.³⁷

²⁹ Vgl. Veit, S. 28

³⁰ Vgl. Borucki, S. 120

³¹ Vgl. Fasold, S. 15

³² Vgl. Kuttruff, S. 264

³³ Vgl. Fasold, S. 33

³⁴ Vgl. Boye, S. 156

³⁵ Vgl. Boré, S. 22

³⁶ Vgl. Brüel & Kjaer, Microphone Handbook, S. 26

³⁷ Vgl. Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik, S. 6

Befindet sich beispielsweise ein Mikrofon im Diffusfeld, so ändert sich der Pegel mit Entfernung zur Schallquelle kaum noch.³⁸

Diese Tatsache gilt es bei der Abschätzung des Störschalls in einem Stadion zu beachten ([siehe: 4.1.1](#)).

3.3 Reflexion

Die Reflexion kann als Spiegelung oder Rückwurf von akustischen Wellen verstanden werden. Vorauszusetzen ist, dass für eine Reflexion von Schallwellen die Grenzfläche oder das Objekt im Schallfeld größer sein muss als die Wellenlänge λ .³⁹ Hinter dem Objekt entsteht ein Schallschatten. Schallanteile, deren Wellenlänge größer ist als die Ausdehnung des Hindernisses, werden um dieses herumgebeugt.⁴⁰

Für unsere späteren Betrachtungen des Störschalls spielt die Reflexion von Schallereignissen an der Bodenfläche (Rasen) sowie der Deckenfläche des Stadions eine Rolle. Diese Flächen sind groß im Verhältnis zur Schallquelle und den ausgestrahlten Wellenlängen. Im Besonderen die Überdachungen sind aufgrund der verwendeten Baumaterialien als Reflektoren wirksam.

3.3.1 Geometrische Gesetze der Schallausbreitung

Ist die Wellenlänge klein zur Reflexionsfläche, so folgen die Reflexionsvorgänge den aus der Optik bekannten Gesetzen.⁴¹ Für die Betrachtung der Schallreflexion eignet sich die Darstellung als Schallstrahlen.⁴²

Unter Schallstrahlen werden hier die Senkrechten auf der Wellenfront, die so genannten Wellennormalen, bezeichnet. Die Richtung der Wellennormale stimmt mit der Fortpflanzungsrichtung der Welle überein.⁴³ Die Strahlen können je nach Richtung unterschiedliche Energie-Anteile mitführen.⁴⁴

³⁸ Vgl. Sengpiel, Mikrofone im Kugelschallfeld

³⁹ Vgl. DEGA, S. 21

⁴⁰ Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 16

⁴¹ Vgl. Fasold, S. 105

⁴² Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 11

⁴³ Vgl. Borucki, S. 79

⁴⁴ Vgl. Cremer, Band 1, S. 9

Die Schallstrahlen breiten sich von der Schallquelle ausgehend geradlinig in alle Richtungen aus und werden an den Grenzflächen von Objekten bzw. Wänden nach dem Reflexionsgesetz der Optik gespiegelt.⁴⁵

Das Reflexionsgesetz lautet:

$$\text{Einfallswinkel } \alpha = \text{Reflexionswinkel } \alpha'$$

Dabei müssen wir beachten, dass die Winkel immer vom Lot, das heisst der Senkrechten auf der Reflexionsfläche, aus gemessen werden.⁴⁶

Das Reflexionsgesetz gilt auch für gekrümmte Flächen. Hierzu muss man sich die Krümmung in kleine, mit hinreichender Genauigkeit als geradlinig anzusehende Teilstücke zerlegt denken. Diese Teilstücke haben dann die Richtung der Tangente an dem betrachteten Punkt.⁴⁷ Auf die Tangente kann zur Ermittlung der Winkel nun das Lot gefällt werden.

3.3.2 Die Parabelform als Reflektor

Aufgrund der später noch festgestellten, guten Eignung des „Parabilmikrofons“ ([siehe: 7.4.3](#)) soll an dieser Stelle auf das Reflexionsverhalten der Parabelform eingegangen werden. Weitere Erläuterungen zum Parabolreflektor in Verbindung mit einem Mikrofon befinden sich in [Kapitel 6.3](#).

Jeder reflektierende Hohlspiegel, dessen Krümmungsradius gleich dem doppelten Senderabstand ist, darf als „parabelförmig“ angesehen werden. In diesem Fall weicht die Parabel erst in den Randgebieten von einer kreisförmigen Spiegelform ab.⁴⁸

Ein solcher Reflektor hat die Eigenschaft, parallel zu seiner „Rotationsachse“ einfallenden Schall in einem „Brennbereich“ ([siehe: 7.2.1](#)) zu bündeln. Die Konzentration der „Schallstrahlen“ ist daran gebunden, dass die Wellenlänge klein ist im Verhältnis zur Reflexionsfläche.⁴⁹

⁴⁵ Vgl. Meyer, S. 53

⁴⁶ Vgl. Marchesi, Photokollegium 2, S. 79

⁴⁷ Vgl. Borucki, S. 80

⁴⁸ Vgl. Cremer, Band 1, S. 39

⁴⁹ Vgl. ebd., S.42

Bei der Parabel trifft jeder Strahl unter einem geringfügig anderen Winkel auf und wird daher unterschiedlich reflektiert. In der Summe ergibt dies den gewünschten Effekt, welcher parallele Strahlenbündel zu einem gemeinsamen „Punkt“ hin umlenkt.⁵⁰ Das Lot auf der Tangente im jeweiligen Reflexionspunkt P ist die Winkelhalbierende zwischen Einfallswinkel und Ausfallswinkel der Reflexion.⁵¹ Die dreidimensionale Variante einer Parabel ist das Paraboloid.⁵²

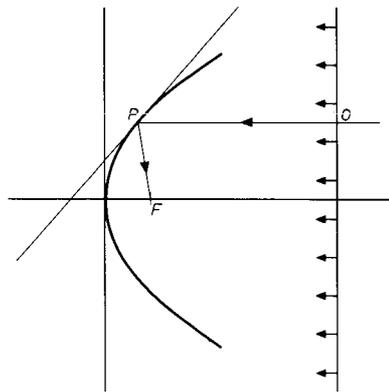


Bild 2. Reflexion eines Schallstrahls O am Punkt P der Parabeloberfläche. Der Strahl wird in den „Brennpunkt“ F („Fokus“) umgelenkt.

Der Durchmesser D bzw. die Öffnung des Paraboloiden hat wesentlichen Einfluss auf die Wirkung des Reflektors. Je größer sie ist, desto weiter reicht die Bündelungswirkung zu tiefen Frequenzen hin. Denn hierdurch vergrößert sich die Reflexionsfläche im Verhältnis zur Wellenlänge.

Die Richtwirkung eines Parabolreflektors erhöht sich mit der Frequenz.⁵³

Von großer Bedeutung für die Schallbündelung ist der achsparallele Einfall einer ebenen Wellenfront. Denn nur in diesem Fall „fokussiert“ die Paraboloidenform die Druckänderungen in eine gemeinsame Zone.

Das Verhältnis von Reflektordurchmesser D (Öffnung der Parabel) zur Strecke r zwischen Reflektor und Schallquelle sowie das Verhältnis von r zu λ bestimmt, ab wann von einer ebenen Wellenfront und somit von parallelen Schallstrahlen ausgegangen werden kann.⁵⁴ Je „größer“ der Reflektor, desto länger muss die Strecke zur Quelle sein, damit die Schalldruckänderungen als parallel aufgefasst werden können.

⁵⁰ Vgl. Marchesi, Fotokollegium 2, S. 89

⁵¹ Vgl. Fasold, S. 105

⁵² Vgl. Marchesi, Fotokollegium 2, S. 92

⁵³ Vgl. Olson, S. 321

⁵⁴ Vgl. Backman, S. 3

Befindet sich die Schallquelle zu nahe am Reflektor oder ist dieser im Verhältnis zur Strecke r nicht klein, müssen die Druckänderungen als kugelschalenförmig angesehen werden. Für diesen Fall verschiebt sich der „Brennpunkt“ vom Spiegelscheitel weg.

3.4 Schallabsorption

Die Schallabsorption soll hier kurz angesprochen werden, da sie für das vom Verfasser verwendete „Vorstellungsmodell zum Schallfeld“ im Stadion ([siehe: 4.1.1](#)) sowie die Betrachtungen des Nutzschalls grundlegend ist.

Absorption ist die verlustbehaftete Reflexion.⁵⁵ Der frequenzabhängige Absorptionsgrad α gibt denjenigen Teil der aufgefallenen Schallenergie an, der beim Reflexionsvorgang nicht wieder in den Raum zurückkehrt.⁵⁶

3.4.1 Absorption durch Publikum und Rasen

In einem Stadion haben gerade die oft großflächigen Publikumsränge einen merklichen Einfluss auf die Schallabsorptionseigenschaften des gesamten Umfelds.⁵⁷ Schallabsorbierend wirkt hier vor allem die Kleidung, die auch als poröser Schallabsorber angesehen werden kann.⁵⁸

Der Absorptionsgrad für Publikum auf einem wenig schallabsorbierenden Gestühl, wie es die Sitzschalen eines Stadions sind, beträgt bei 1 kHz ca. $\alpha = 0,8$. Dies bedeutet, es werden 80% des auftreffenden Schalls absorbiert. Bei höheren Frequenzen bleibt α in etwa konstant. Unterhalb 1 kHz verringert sich α auf bis zu 0,40 bei 125 Hz.⁵⁹ In einem vollbesetzten Stadion, wie es im Verlaufe der Ausarbeitung angenommen wird ([siehe: 4](#)), verursacht das Publikum also eine bedeutende Schallabsorption.

⁵⁵ Vgl. Cremer, Band 1, S. 109

⁵⁶ Vgl. ebd., S. 109

⁵⁷ Vgl. Goertz, „Stadion Moskau“, S. 1

⁵⁸ Vgl. Fasold, S. 98

⁵⁹ Vgl. ebd., S. 99

Die Schallabsorption durch Rasenfläche fällt für unsere Betrachtungen nicht ins Gewicht. Wesentliche Bedämpfungseffekte für Schall treten erst bei höherem Bewuchs, wie beispielsweise Gebüsch und Bäumen, in Erscheinung.⁶⁰ Als Richtwert für die Rasenhöhe sind 28 mm anzusehen.⁶¹

3.5 Meteorologische Einflüsse

Das Wetter ist ein Faktor, welcher bei der Entwicklung des Systems nicht vergessen werden darf. Einerseits muss die Mechanik und Elektronik des Mikrofons den rauen Umgebungsbedingungen standhalten. Andererseits nimmt das Wetter Einfluss auf die Schallausbreitung. Die entstehenden Effekte sollen in den nachstehenden Zeilen betrachtet werden.

Meteorologische Einflüsse wie Wind und Temperatur können sich in erheblichem Maße auf die Schallausbreitung über große Entfernungen auswirken, sind aber wegen ihrer Wechselhaftigkeit nur schwer für die Planung auswertbar.⁶²

Der Einfluss von Nebel, Regen und Schneefall auf die Schallausbreitung ist unerheblich.⁶³

3.5.1 Wind

Da Wind im Wesen eine Bewegung von Luftteilchen ist, beeinflusst er die Schallausbreitung merklich.⁶⁴

Bei Schallausbreitung in Windrichtung wird der Schall nach unten gebeugt, bei Ausbreitung entgegen der Windrichtung nach oben. Starker Gegenwind kann die Reichweite des Schalls sehr einschränken.⁶⁵ Die Beugung kann in Gegenwindrichtung zur Bildung von Schattenzonen führen. In Windrichtung verursacht die Beugung, dass der Schall abschirmende Bebauung oder Hindernisse „überwinden“ kann.⁶⁶

⁶⁰ Vgl. Henn, S. 206

⁶¹ Vgl. FIFA-Empfehlung

⁶² Vgl. Fasold, S. 39

⁶³ Vgl. Heckl, S. 444

⁶⁴ Vgl. Boye, S. 157

⁶⁵ Vgl. ebd., S. 158

⁶⁶ Vgl. Fasold, S. 39

Da die Windgeschwindigkeit im Verhältnis zur Schallgeschwindigkeit relativ gering ist, wird die Schallgeschwindigkeit normalerweise nicht wesentlich durch den Wind beeinflusst.⁶⁷

Durch vermehrte Errichtung geschlossener, überdachter Stadien wird der Windeinfluss gering gehalten. Da die akustische Betrachtung für ein überdachtes, von hohen Tribünen umgebenes Stadion erfolgt, können Windeinflüsse in dieser Ausarbeitung außer Acht gelassen werden.

3.5.2 Temperatur und Luftfeuchte

Die Schallgeschwindigkeit wächst mit der Temperatur.⁶⁸ In weitläufigen akustischen Umfeldern, wie beispielsweise Arenen und Stadien, können Veränderungen in Temperatur und Luftfeuchte die Schallausbreitung über große Distanzen beeinflussen.⁶⁹

Ist die Schallgeschwindigkeit nicht konstant, so ändert sich die Richtung der Schallstrahlen stetig.⁷⁰ Durch Temperaturunterschiede einzelner Luftschichten kommt es so zu Brechungserscheinungen.⁷¹

Auch bei ungestörter Ausbreitung in Luft treten frequenzabhängige Dämpfungsverluste auf. Diese sind proportional zur Entfernung und steigen mit zunehmender Frequenz an. Weit entfernte Quellen erleiden daher einen „Höhenverlust“, also eine Pegelreduktion der oberen Hörfrequenzen. Je niedriger die Luftfeuchtigkeit und Temperatur, desto ausgeprägter ist dieser Effekt.⁷² Genauere Werte zum Einfluss der Luftabsorption auf die Schallausbreitung enthält [Kapitel 4.5.3](#).

Da die Luftreibung einen Teil der Schalleistung in Wärme umwandelt, wird dieser Vorgang auch als Dissipation bezeichnet.

⁶⁷ Vgl. Juncker, S. 13

⁶⁸ Vgl. Cremer, Band 1, S. 12

⁶⁹ Vgl. Mapp, S. 6

⁷⁰ Vgl. Kuttruff, S. 92

⁷¹ Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 17

⁷² Vgl. Juncker, S. 12

4 Das Schallfeld im Fußballstadion

Um die richtigen Schlüsse für die Entwicklung des Systems zu ziehen, ist es von großer Wichtigkeit, die akustische Umgebung, in welcher das Mikrofon zum Einsatz kommt, zu kennen. Neben Daten wie dem herrschenden Schalldruckpegel müssen Betrachtungen zu den im Schallfeld befindlichen Gebäudeteilen gemacht werden. Denn durch Reflexionen oder Dämpfungerscheinungen nehmen diese Einfluss auf die vorzufindenden, akustischen Verhältnisse.

Wichtig ist auch, Informationen über Frequenz- und Zeitverläufe der am Aufnahmeort ankommenden Schallereignisse zu sammeln. Somit kann das zukünftige Mikrofon auf seinen speziellen Einsatzzweck hin optimiert werden.

Zielgerichtet will der Autor versuchen, die Bedingungen, unter welchen das System eingesetzt wird, mittels einer akustischen Abschätzung zu beurteilen.

4.1 Störschall im Stadion

Unter Störschall sind im Folgenden sämtliche Schallquellen in einem Stadion zu verstehen, die sich nicht auf dem Spielfeld befinden und daher keinen Anteil an der Entstehung der Feldgeräusche haben.

Die Beschallungsanlage des Stadions wird in dieser Ausarbeitung vernachlässigt. Sie kommt ohnehin nur während der Halbzeitpause oder für kurze Ergebnis- und Informationsdurchsagen während des Spiels zum Einsatz. Die wesentlichste Störquelle für das Mikrofon ist deshalb der vom Publikum erzeugte Schall.

Der Pegel der Zuschauergeräusche variiert stark. Er ist vom Spielgeschehen auf dem Platz abhängig. Außerdem wächst der Störschallpegel mit der Zuschauerzahl. Der Geräuschpegel bei offener Bauweise eines Stadions ist geringer als bei einem geschlossenen, überdachten Gebäude.⁷³

Vor dem Spiel oder in Halbzeitpausen liegt der Pegel bei ca. 75 dB(A).^{74,75} Bei „normalem“ Spiel entstehen durchschnittlich Werte von ca. 85 dB(A). Während spannenden Torraumszenen oder bei Torjubel können zwischen 95 bis 100 dB(A)

⁷³ Vgl. Peutz, S. 44

⁷⁴ Vgl. Boye, AES-Paper, S. 2

⁷⁵ Vgl. Peutz, S. 44

zustande kommen.^{76,77} Diese Werte wurden auf den Tribünen, inmitten der Zuschauer erfasst. Eine Studie zu den Zuschauergeräuschen in englischen Stadien ermittelte Werte von 80 dB(A) bis zu 114 dB(A).⁷⁸ Malmund kam in seinen Versuchen auf Maximalwerte um 105 dB.⁷⁹ Der ermittelte Störschallpegel beispielsweise im Stadion Salzburg, welches Spielort der Fußball-Europameisterschaft 2008 sein wird, liegt bei ca. 95 dB.⁸⁰

In den akustischen Betrachtungen soll daher ein Wert für die Störgeräusche von 100 dB(A) zum Einsatz kommen. Da dies eher unvorteilhafte Bedingungen sind, soll so die Praxistauglichkeit für das System sichergestellt werden.

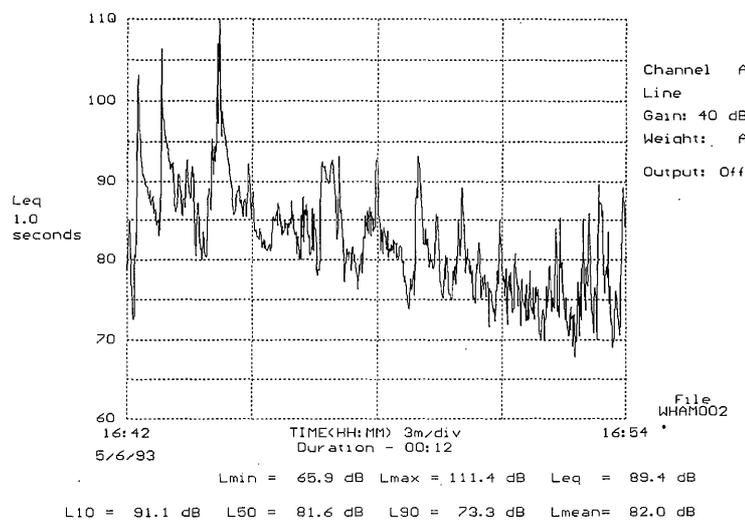


Bild 3. Schalldruckpegel des Publikums während eines Fußballspiels.

Die Frequenzanalyse des Tribünenschalls zeigt ihr Maximum bei 1 kHz. Bei „ruhigeren“ Spielsituationen steigt der Schalldruck für tiefer liegende Schallanteile langsam an. Oberhalb 1 kHz fallen die Frequenzen in normalen Spielsituationen schnell ab.

Die Frequenzverteilung ändert sich bei erhöhtem Schalldruckpegel. Bei einer einzelnen Stimme ist das Sprachspektrum von der Sprechlautstärke abhängig. Je lauter gesprochen wird, um so obertonreicher ist das Sprachspektrum.⁸¹ So auch bei einer Menschenmenge. Torraumszenen, die heftige Reaktionen des Publikums

⁷⁸ Vgl. Mapp, S. 3

⁷⁹ Vgl. Malmund, S. 568

⁸⁰ Vgl. Kern, S. 24

⁸¹ Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 64

hervorrufen, ergeben eine Änderung in der Frequenzverteilung durch Ansteigen des Schallpegels. Charakteristisch für die höheren Pegel sind die Frequenzbänder von 250 Hz bis 2 kHz. Diese steigen im Verhältnis zu den übrigen Spektralanteilen stärker an.⁸² Der Anstieg zu 1 kHz ist nun „steiler“, während der schnelle Abfall im Pegel erst ab ca. 4 kHz einsetzt. Bei der Abschätzung der Tauglichkeit des Mikrofons gilt es daher, im Besonderen diesen Bereich zu bedenken. Das Mikrofon sollte hier gute Dämpfungswerte bieten.

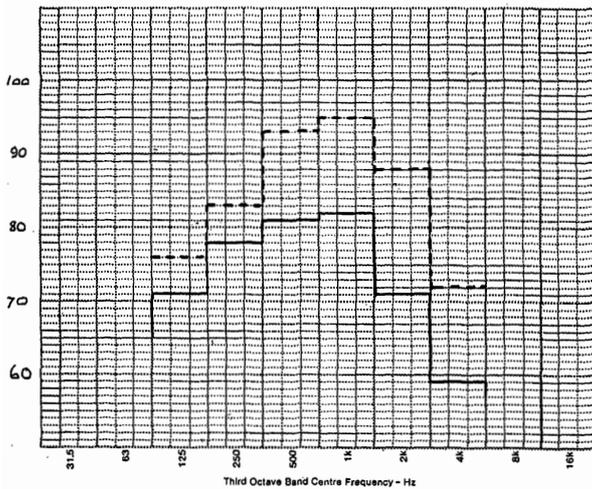


Bild 4. Spektralanalyse von Publikumsschall.

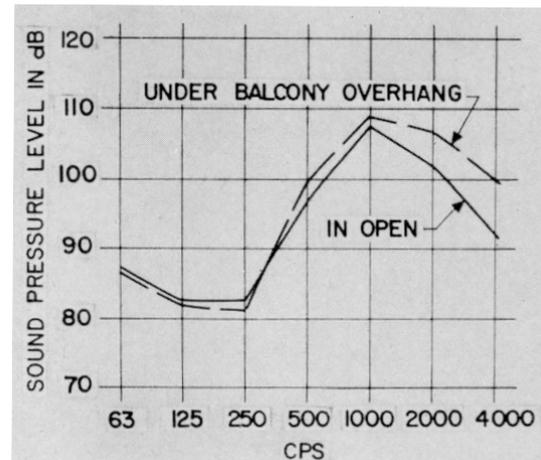


Bild 5. „Lautes“ Publikum im Stadion. Die durchgezogene Linie zeigt die Spektralverteilung im offenen Tribünenbereich, die gestrichelte Linie diejenige auf dem hintersten Platz, der von einer darüber liegenden Tribüne „überdacht“ wird.

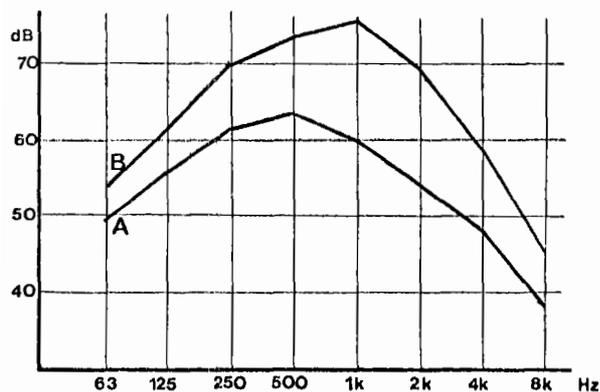


Bild 6. Frequenzspektrum menschlicher Sprache. Kurve A entspricht „normaler“ Sprachlautstärke. Kurve B zeigt die Frequenzverteilung einer „schreienden“ Stimme. Erkennbar ist die Ähnlichkeit zu Bild 4.

⁸² Vgl. Mapp, S. 15

4.1.1 Vorstellungsmodell zum Schallfeld

Beim Publikum handelt es sich, akustisch betrachtet, um eine Ansammlung vieler Punktschallquellen. Jede dieser Punktschallquellen besitzt unterschiedliche Frequenzspektren und Amplituden. In der Summe ergibt dies eine flächige, unkorreliert strahlende Rauschquelle. Wir gehen in dieser Schrift von einem vollbesetzten Stadion aus. Dadurch entsteht ein hoher Störpegel, jedoch auch ein für unsere Zwecke nahezu reflexionsfreies Schallfeld durch die Absorption des Publikums ([siehe: 3.4.1](#)).

Weiter nehmen wir für unsere Betrachtungen ein Stadion mit überdachten Zuschauerrängen an. So empfiehlt die FIFA für den Neubau von Stadien in jedem Fall eine Überdachung.⁸³ Gerade für internationale Bewerbe ist dies gefordert. Auch die Stadien der Bundesliga sind zum Großteil überdacht.

Es kann somit angenommen werden, dass der Störschall vom rundherum angeordneten Publikum, der Rasenfläche (1. Reflexion) sowie der Stadiondecke (1. Reflexion) abgestrahlt wird. Dies führt zu einem Schallfeld, welches das Mikrofon allseitig umschließt.

Die ersten Reflexionen des Störschalls dürften sich im Pegel nicht zu sehr von den direkt ankommenden Störanteilen unterscheiden. Denn im Verhältnis zur gesamten Strecke ist der Wegunterschied zwischen direktem und reflektiertem Störschall gering. Somit ist der Unterschied in der entfernungsabhängigen Schalldruckabnahme zwischen direktem und indirektem (reflektiertem) Störschall ebenfalls klein.

Zusätzliche Reflexionen können durch das gut absorbierende Publikum sowie die großen Entfernungen, durch welche sich der Schall abschwächt, vernachlässigt werden. Da der Schalleinfallsbereich des Mikrofons bereits vollständig vom diffusen Störschall abgedeckt ist, würden diese Reflexionen den Pegel an der Membran ohnehin nur noch geringfügig erhöhen.

Nach dieser Argumentation kann von einem „Störstrahler“ ausgegangen werden, dessen Schall von allen Seiten auf das Mikrofon trifft.

In einem „offenen“ Stadion müsste nur der direkt vom Publikum abgestrahlte Schall und die Rasenreflexion betrachtet werden. Der Störpegel würde geringer ausfallen. Das Mikrofon wäre nicht von jeder Seite gleich stark vom Schallfeld umgeben.

⁸³ Vgl. FIFA, Fußballstadien, S. 104

4.2 Nutzschaall - Ermittlung der Schalldruckpegel und Frequenzspektren

Im Gegensatz zu den Informationen zum „Störschallpegel“ des Publikums in einem Stadion waren zum Bereich des Schalldrucks sowie der Frequenzspektren der beim Fußballspiel entstehenden Feldgeräusche, die hier als „Nutzschall“ bezeichnet werden, keine bereits ermittelten Werte oder Untersuchungen zu finden.

Da auf dem Gelände des Bayerischen Rundfunks, auf welchem sich auch das IRT befindet, eine große Rasenfläche mit zwei Fußballtoren vorhanden ist, fand die Ermittlung der benötigten Daten im „Selbstversuch“ statt. Verschiedenste Schussvarianten wurden durchgeführt.

Es ist offenkundig, dass die so gewonnenen Erkenntnisse sehr individueller Natur sind. Dennoch konnten gerade in Bezug auf die entstehenden Schallpegel bei Torschüssen oder Pässen wichtige Anhaltspunkte gewonnen werden. Die Werte bei Profifußballern könnten von den hier verwendeten abweichen. Unterschiede des Schalldrucks dürften aber eher zu „lauteren“ Pegeln hin gehen. Weiter ist davon auszugehen, dass die unterschiedlichen baulichen Voraussetzungen der Stadien und Veranstaltungsorte und die damit verbundenen, sich von Ort zu Ort ändernden Entfernungen von Schallquelle zu Mikrofon, einen wesentlich größeren Einfluss auf die am Mikrofon messbaren Schalldruckpegel haben.

Die Unterschiede zwischen Fußballprofi und „IRT-Fußballer“ sollten daher für die weiteren Betrachtungen vernachlässigbar bzw. durch eine einzukalkulierende Toleranz in den „Aufnahmeentfernungen“ zu rechtfertigen sein.

Bei der Frequenzverteilung der Feldgeräusche sollten die Abweichungen ebenso eher marginal sein. Auch hier spielen entfernungsabhängige „Bedämpfungseffekte“ durch die Luft eine Rolle.

4.2.1 Messung Schalldruckpegel

Die Messung der Schallpegel wurde mit einem Schalldruckmessgerät „Acoustilyzer AL1“ der Firma NTI durchgeführt. Dieses Gerät bietet die Möglichkeit der Speicherung von Messdaten. Sie lassen sich nach abgeschlossener Messung „im Feld“ bequem per USB-Schnittstelle auf den Computer übertragen und auswerten. Der Schalldruckpegel wurde mit zugeschaltetem A-Bewertungsfilter gemessen. Dieser Filter wurde gewählt, da er für die zu erwartenden Schallpegel und Frequenzspektren die der Gehörwahrnehmung am nächsten kommende

„Interpretation“ der Signale liefert.⁸⁴ Als Zeitbewertung wurde „fast“ gewählt. Bei den zu messenden Signalen handelt es sich um sehr impulsive Ereignisse. Integriert das Messgerät über einen, auf das Schallereignis bezogen, zu langen Zeitraum, wird die Messung verfälscht. Die Zeitkonstante bei „fast“-Einstellung beträgt 125 ms.⁸⁵

Das kalibrierte Messmikrofon „MiniSPL“ wurde auf einer Höhe von 20 cm angebracht. Die Entfernung zum getretenen Ball betrug 1 m. Das Umgebungsgeräusch während der Messung lag bei ca. 50 dB(A), mit Schwankungen von etwa ± 3 dB(A).

Der Mittelwert des Schalldruckpegels aller gemessenen „Torschüsse“ betrug ca. 90 dB(A). Auch zur Pegelbewertung des „Abschlags“ eines Torwarts kann dieser Wert der Orientierung dienen. Im Anhang findet sich eine Tabelle mit den Schalldrücken der einzelnen Schüsse ([siehe: Anhang A](#)).

Für „Pässe“ ergaben sich nach Mittelung Pegel um 80 dB(A). Hier handelt es sich um „stärkere“ Pässe. Diese können im Schalldruck mit „Flanken“ und „Freistößen“ verglichen werden.

Durch die Messung des Schalldrucks konnten auch Hinweise auf die Abstrahlcharakteristik und die damit verbundene entfernungsabhängige Schalldruckabnahme der Feldgeräusche gefunden werden. So zeigten die Messungen eine Verringerung des Pegels um ca. 6dB(A) bei Verdopplung der Entfernung ([siehe: Anhang A](#)). Die Abnahme des Schalldrucks folgt dem $1/r$ -Gesetz. Dies lässt auf eine kugelartige Form der Wellenausbreitung der Schallquelle aus Ball und Schuh schließen.

4.2.2 Messung Frequenzspektrum

Frequenzanalysen der „Kick-Geräusche“ wurden ebenfalls zunächst mit dem „Acoustilyzer“ und dessen integrierter FFT-Funktion⁸⁶ durchgeführt. Die ermittelten Werte waren in ihrer Auflösung jedoch zu ungenau. Daher wurde für die Analyse der spektralen Zusammensetzung die Software „EASERA“ von SDA verwendet. Mit diesem Programm geschah auch die Erstellung der beigefügten Diagramme ([siehe: Anhang B](#)). Die zu analysierenden Signale wurden mit einem 4-Spur-Field-Rekorder

⁸⁴ Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 9

⁸⁵ nach IEC 61672 / Vgl. Acoustilyzer Handbuch, S. 25

⁸⁶ FFT = Fast Fourier Transformation

„Edirol R4“ in Verbindung mit einem „Neumann KM83i“ Mikrofon mit Kugelrichtcharakteristik aufgezeichnet. Die dynamische und zeitliche Auflösung des digitalen Audiomaterials lag bei 24 Bit / 48 kHz. Wie schon bei der Messung des Schalldrucks betrug der Abstand von Mikrofon zu Ball 1 m, die Höhe des Mikrofons über dem Rasen 20 cm. Diese Entfernungen wurden gewählt, da sich so der „Störabstand“ des Nutzschalls zu den Umgebungsgeräuschen vergrößerte und die spätere Analyse vereinfachte.

Es erfolgte noch eine vergleichende Aufnahme mit dem Kugelmikrofon in 15 m Abstand. Die Ergebnisse der Frequenzanalyse des Mikrofonsignals aus 15 m waren in etwa deckungsgleich mit denen aus 1 m Entfernung. Erwartungsgemäß war durch die gesteigerte Distanz zum Mikrofon der dort gemessene „Störabstand“ zwischen Nutz- und Umgebungsschall geringer. Spektrogramme zu den Schüssen mit einer Mikrofondistanz von 15 m können in [Kapitel 8.2](#) sowie in [Anhang B](#) eingesehen werden.

Wegen des besseren „Störabstandes“ zum Umgebungsschall wurden für die genauere Analyse Schüsse aus 1 m Entfernung herangezogen. Aus der Vielzahl an „Kicks“ wurden 5 verwendet. Die Auswahl erfolgte aufgrund des subjektiven Höreindrucks. Ausschlaggebend war ein „satter“, „wuchtiger“ und somit „voller“ Klang der Schüsse.

Die Analyse der Spektrogramme zeigt für sämtliche Schüsse eine Anhäufung von Schallenergie im Bereich um 100 Hz. Dies ist das absolute Maximum bei allen Schüssen. Von hier an fallen die Schallpegel zu höheren Frequenzen ab. Es sind jedoch weitere, kleinere „Erhöhungen“ im Gebiet um 250 Hz und 500 Hz auszumachen. Allgemein ist sichtbar, dass die stärksten Anteile des Signals unter ca. 1 kHz vorzufinden sind. Auffällige Gemeinsamkeiten weisen die ausgewählten Schüsse durch ansteigende Pegel bei einer Frequenz ab 4 kHz auf. Im Bereich um 6 kHz führt dies zu einem Maximum, von welchem an sich der Pegel bis zu einer Frequenz von ungefähr 16 kHz stetig verringert. Bei allen betrachteten Signalen lassen sich zudem schmalbandige Minima zwischen 1 kHz bis ca. 4 kHz erkennen. Bei der Filterung des Signals mit einem Hochpass können Schallanteile bis zu den höchsten Frequenzen nachgewiesen werden.

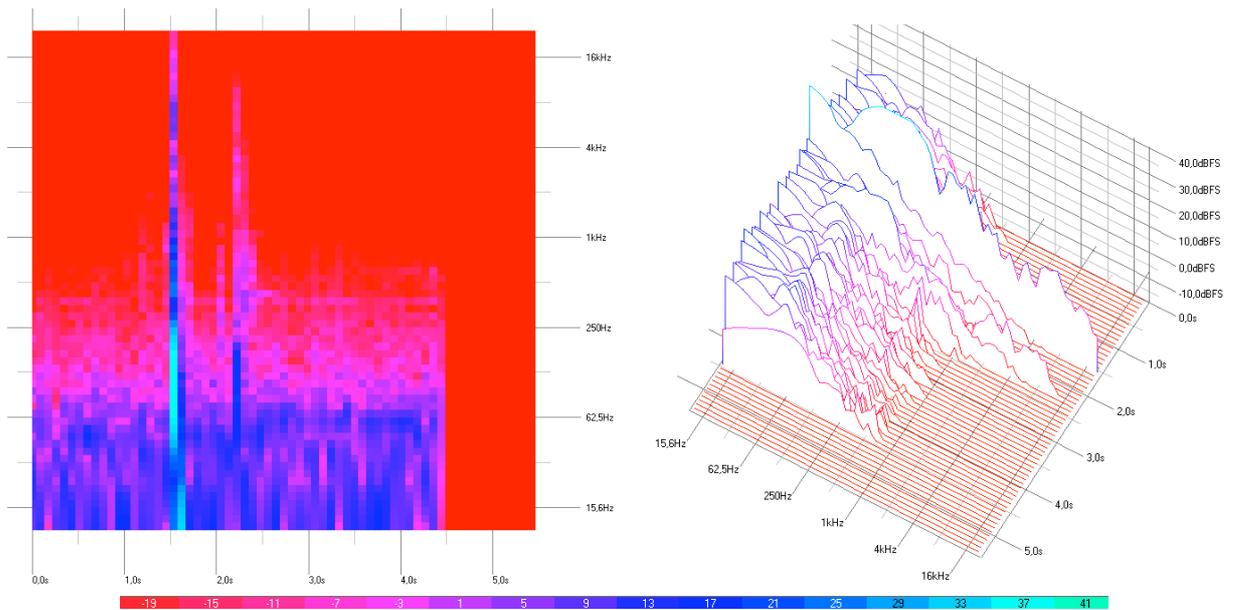


Bild 7. Links oben das Spektrogramm eines Schusses. Die zweite „Linie“ bei ca. 2,2 s zeigt die Berührung von Ball und Torpfosten. Auf der rechten Seite das zugehörige „Wasserfalldiagramm“. Weitere grafische Darstellungen zu „Torschüssen“ befinden sich in [Anhang B](#).

Obwohl die „Ballkicks“ unterschiedliche Höreindrücke hinterlassen, zeigen sie also einige Gemeinsamkeiten in ihrer spektralen Zusammensetzung. Es ist jedoch anzunehmen, dass die festgestellten Charakteristika bei anderen Situationen abweichen können. Einfluss haben hier Materialien von Ball und Schuh, Luftdruck des Balles und damit verbundene Verformbarkeit sowie die Beschaffenheit des Untergrundes. Auch Wasser und Feuchtigkeit, z.B. durch Regen verursacht, auf Rasen und Ball haben Auswirkungen auf die abgestrahlten Frequenzen. Eine Veränderung des Schallereignisses bewirkt nicht zuletzt die Art der „Ballberührung“, also wie der Schuh auf den Ball trifft. Schießt der Spieler den Ball nur mit „der Spitze“, entsteht ein „dünnere“ Klang. Anders bei einem Schuss, welcher mit dem Spann vollführt wird. Durch die größere Schuhfläche, die hier auf eine größere Ballfläche trifft, strahlt die Kombination aus beidem tiefere Frequenzen ab.

4.3 Auswahl der Mikrofonstandorte

An dieser Stelle werden zunächst die Überlegungen, welche zur Wahl der später noch näher betrachteten Standorte führen, dargestellt.

Bei der Suche nach einem geeigneten Mikrofonstandort gibt es mehrere Punkte zu beachten:

Zuerst ist eine Position erwünscht, die uneingeschränkte Sicht zur aufzunehmenden Schallquelle bietet. Denn wie in Kapitel 3 dargestellt, wird der Schall durch Objekte in seinem Ausbreitungsweg beeinflusst. Außerdem ist eine Position möglichst nahe an der Nutzschallquelle zu finden. So soll die entfernungsabhängige Schalldruckabnahme ([siehe: 3.1.1](#)) gering gehalten werden. Betrachten wir nur diese Anforderungen, so ist eine Position direkt am Spielfeldrand am naheliegendsten.

Allerdings gilt es, ebenso die Reglements der Sportverbände zu beachten, die nicht jede geplante Mikrofonposition zulassen ([siehe: 2.1.2](#)). Beispielhaft zu nennen ist hier der Hinweis der UEFA in ihren „Richtlinien zur Champions League“. So wird darauf hingewiesen, dass Medianausrüstung und Personal so positioniert werden müssen, dass sie keinerlei Gefahr für Spieler oder Schiedsrichter darstellen. Auch dürfen Spieler und Trainer nicht in Blickfeld oder Bewegungsfreiheit eingeschränkt oder verwirrt werden.⁸⁷

Dieser Punkt sollte aufgrund der geplanten, mechanischen Nachführung des Mikrofons mittels „Drehteller“ besonders bedacht werden. So könnte durch das sich bewegende Mikrofon am Spielfeldrand eben eine solche „Verwirrung“ und „Ablenkung“ von Spielern, Trainern und nicht zuletzt Zuschauern eintreten. Auch für die Bildgestaltung der Kameras könnten sich bewegende Mikrofone aus denselben Gründen als ungeeignet herausstellen. Im Übrigen kann die Kombination von Mikrofon und „Drehteller“ größere Abmessungen einnehmen. Die Größe des Systems führt neben der „Ablenkung“ auch zu einer eventuellen Sichtbeeinträchtigung.

Da der Motor zur Nachführung in einem schallabsorbierenden, schweren Gehäuse untergebracht ist, besteht an dieser Stelle zudem eine gewisse Verletzungsgefahr für die Spieler. Wie die Kameras an den Seitenlinien, müsste das System mit so genannten gepolsterten „Kamerabanden“ versehen werden, um die Verletzungsgefahr für die Akteure auf dem Platz zu senken.

⁸⁷ Vgl. UEFA, Reglement zur Champions League, S. 57

Diese Tatsachen veranlassen dazu, zunächst von einer Positionierung an der Seitenlinie abzusehen. Stattdessen soll ein Standpunkt außerhalb des für Zuschauer und Kamera sichtbaren Bereichs gefunden werden. Auf diese Weise entwickelte sich der Ansatz, einen Mikrofonstandort bei den erhöhten, inmitten der Zuschauerränge angebrachten, Haupt- bzw. Führungskameras in Betracht zu ziehen.

Neben der Unauffälligkeit des Systems gibt es noch weitere Argumente, die für eine Positionierung des Mikrofons bei den Führungskameras sprechen.

Finden Spielaktionen in der Nähe der gegenüberliegenden Seitenlinie statt, so kann das Schallereignis direkt „anvisiert“ werden, ohne Hindernisse im Schallweg zu befürchten. Bei einer flachen Position besteht die Möglichkeit von Schallereignissen, die sich im Vordergrund des eigentlich interessierenden Geräusch abspielen. Beispiel hierfür ist der Einwurf an der Seitenlinie mit sprechenden Spielern im Vordergrund. Von der Kameraplattform aus können die Schallereignisse also besser ausgewählt werden.

Vorteilhaft am gedachten Standpunkt ist die Unempfindlichkeit gegen Wettereinflüsse. Die meisten modernen Fußballstadien besitzen überdachte Tribünen, zumindest an der Hauptkameraposition.

Auf den bereits vorhandenen Kameraplattformen ließe sich das Mikrofon unkompliziert installieren. Es sind keine neuen Kabelwege erforderlich.

Unter dem Gesichtspunkt der Dynamik der Feldgeräusche ist der erhöhte, in Höhe der Mittellinie gelegene Mikrofonstandort eventuell von Vorteil. Im Idealfall werden durch die jeweiligen Spielweisen in unterschiedlichen Entfernungen die stark wechselnden Schallpegel des Nutzschalls am Ort des Mikrofons etwas angeglichen.

In Bezug auf die Verwendung eines Reflektormikrofons bestünde bei einer Positionierung außerhalb des Sichtbereichs die Möglichkeit, den Reflektor zu vergrößern, ohne eine Sichtbeeinträchtigung zu provozieren. Durch eine erweiterte Reflexionsfläche wird die Effektivität des Reflektors erhöht ([siehe: 6.3](#)). Auch die Abschirmung gegen Störgeräusche verbessert sich. Es muss keine Rücksicht auf „visuelle Anforderungen“ genommen werden.

Von Nachteil ist die große Entfernung zum Spielgeschehen. Das Mikrofon muss daher über ein starkes Bündelungsmaß verfügen ([siehe: 5.3](#)).

Der Verfasser vertritt die Ansicht, dass für eine erfolgreiche Einführung des Systems auf solche visuellen Ansprüche geachtet werden muss. Die technischen Apparate am

Spielfeldrand sollten den Zuschauer im Stadion nicht vom Spiel ablenken. So gesehen wäre der auch als „Master Shot“ bezeichnete Standort am geeignetsten.

Dennoch soll als Alternative zusätzlich eine „akustisch ideale“ Position betrachtet werden. Dabei ist nur die bestmögliche Aufnahme der Feldgeräusche von Interesse. Visuelle Beeinträchtigungen für Zuschauer und Kamera werden, soweit es vertretbar erscheint, außer Acht gelassen. Dieser Ansatz wird aufgrund der großen Entfernungen, die durch eine Positionierung des Mikrofons bei den Führungskameras entstehen, zusätzlich verfolgt. Denn bereits bei der Ermittlung der Distanzen für den geplanten Standort „Hauptkamera“ war abzusehen, dass die „geometrisch“ bedingte Schalldruckabnahme zu einem sehr niedrigen Nutzschaallpegel am Mikrophon führen wird.

Die „akustisch ideale“ Position soll sich an der Seitenlinie, zwischen Spielerbank und Strafraumgrenze befinden. Es sollen sich zwei Systeme den gesamten Aufnahmebereich teilen, was zu geringerer „geometrischer Pegelabnahme“ führt.

4.4 Entfernungen zur Abschätzung des Nutzschaalls

Wegen des in [4.1.1](#) aufgezeigten Vorstellungsmodells zum Störschaall, welches von einem allseitig gleichen Störpegel im mit überdachten Tribünen ausgestatteten Stadion ausgeht, sind die genaueren Betrachtungen der baulichen Vorgaben nur zur Abschätzung des aufgenommenen Nutzschaalls von Bedeutung. Reflexionen der Feldgeräusche sind wegen hoher Absorption des Publikums ([siehe: 3.4.1](#)) und großer Wegstrecken zu vernachlässigen. Nur der direkte Schallanteil der Nutzquelle ist von Interesse.

Da das Mikrophon an vielen verschiedenen Spielorten eingesetzt werden soll, ist es wenig sinnvoll, die Entwicklung auf eine bestimmte Baulichkeit abzustimmen. Die ermittelten Strecken nehmen ihren Ausgangspunkt daher in den Empfehlungen und Vorgaben der FIFA⁸⁸ sowie UEFA⁸⁹. Zusätzlich fließen die Verhältnisse von einigen, bereits gebauten Stadien, in die Bestimmung mit ein. Von den recherchierten Abmessungen wird ein Mittelwert gebildet. Um eine hohe Praxistauglichkeit des Mikrofons sicher zu stellen, kommen eher „weidläufige“ Entfernungen und „ungünstige“ Bedingungen in die Auswahl.

⁸⁸ franz. Fédération Internat. de Football Association, dt. Internat. Föderation des Verbandsfußballs

⁸⁹ franz. Union Européenne de Football Association, dt. Vereinigung europäischer Fußballverbände

Die aufgezeigten Entfernungsangaben werden auch vor dem Hintergrund einer weiteren Verwendung für das Projekt ausgewählt. So können diese in Zukunft für die Entwicklung des „Nachführsystems“ herangezogen werden.

Bei den zu beschreibenden Entfernungen handelt es sich um so genannte Sichtlinien, also den geradlinigen, direkten Weg von Quelle zu Empfänger. Im weiteren Verlauf kommt auch die Bezeichnung „Luftlinie“ zum Einsatz.

Betrachten wir die aufzunehmenden Schallereignisse, wird erkenntlich, dass der Abstand der „Nutzschallquelle“ aus Spieler und Ball zum Mikrofon stark variieren kann. Die Auswahl der Orte auf dem Spielfeld orientiert sich daher an häufig vorkommenden, typischen Spielsituationen. Ebenso soll der am weitesten entfernte Ort bestimmt werden. Die Spielaktionen sind auf der „Längsachse“ des Feldes anzunehmen. Es ist damit die „gedachte“ Linie gemeint, welche den Anstoßpunkt mit den beiden Strafstoßpunkten verbindet. Hierdurch ergaben sich folgende Orte:

Spielort
Anstoßpunkt (Mittelfeld)
Strafraumgrenze (häufige Freistoßsituation)
Strafstoß (Torschuss)
Eckball, gegenüberliegend (Extremfall)

Die ermittelten Strecken finden in Abschnitt [4.5](#) zur Abschätzung der Pegelverhältnisse Anwendung.

4.4.1 Standort „Hauptkamera“

Da die Platzierung des Mikrofons zunächst bei den Führungskameras erwogen wird, ist die Kenntnis der Entfernungen zwischen dem Ball und der Kameraplattform, auf welcher sich das Mikrofon befindet, grundlegend.

FIFA sowie UEFA setzen für Spiele auf professionellem Niveau ein Spielfeld mit den Ausmaßen 105×68 m voraus.⁹⁰ Die Spielflächen aller Bundesligastadien weisen

⁹⁰ Vgl. FIFA, Fußballstadien, S. 60

diese Abmessungen vor. Es wird eine gesamte Rasenfläche von 125×85 m empfohlen.⁹¹

Als Entfernung für den Beginn der Tribünen hinter den beiden Torlinien werden 10 m empfohlen. Der für uns bedeutende Abstand des Beginns der Tribüne von der Seitenlinie liegt in den Empfehlungen bei 8,5 m.⁹²

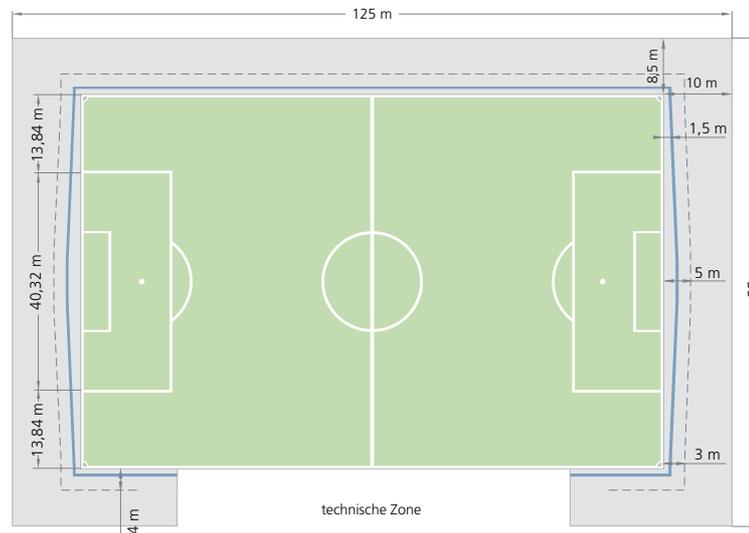


Bild 8. Empfohlene Abmessungen von Spielfeld (105×68 m) und Umrandung.

Entscheidend für die Positionierung der Kameraplattform sind die entstehenden Sichtlinien. Die Plattformen müssen die Möglichkeit bieten, die Hauptkameras auf der Haupttribüne in Höhe der Mittellinie so aufzustellen, dass der Winkel zwischen der Linie zur näher liegenden Seitenlinie und der Horizontalen 27° bis 35° und jener zwischen der Linie zum Mittelpunkt des Spielfeldes und der Horizontalen 15° bis 20° beträgt. Falls es nicht möglich ist, die Kameras so zu positionieren, werden sie am nächstgelegenen möglichen Punkt innerhalb des von beiden Linien gebildeten Sektors installiert ([siehe: Anhang C](#)).⁹³

Die genannten Kamerawinkel legen also in Abhängigkeit von Abstand und Aufrissgeometrie der Tribüne die Einbauhöhe der Plattform fest.⁹⁴

Hintergrund dieser Anforderung sind neben einem einheitlichen Sendebild auch „werbetechnische“ Gründe. So ist ein korrekter Kamerawinkel für die perspektivisch

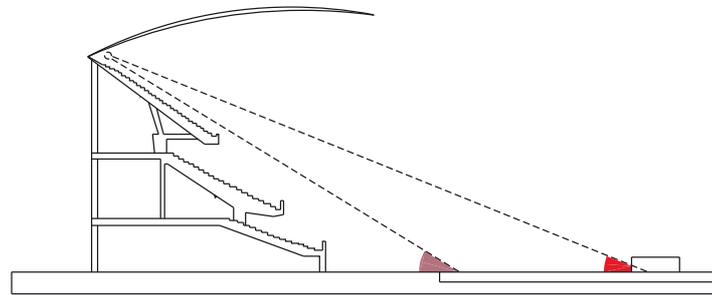
⁹¹ Vgl. ebd., S. 60

⁹² Vgl. FIFA, Fußballstadien, S. 60

⁹³ Vgl. FIFA, Technische Empfehlungen, S. 132

⁹⁴ Vgl. Nixdorf, S. 101

richtige Darstellung der neben den Torpfosten befindlichen „3D-Werbeplakate“⁹⁵ erforderlich. Des Weiteren ist durch die Reglementierung die Sicht auf hintereinander versetzte Werbebanden gewährleistet.



1) PLATFORM FOR THE PRINCIPAL TELECAMERAS
DIMENSIONS: 9x2 m.

ALFA: 27/35° FOR THE SIDE LINE

BETA: 15/20° FOR THE CENTER PLAYGROUND

Bild 9. Optimale Position der Hauptkamera nach FIFA-Empfehlung.

Der durch die genannte Bedingung entstehende Sektor ermöglicht Entfernungen zwischen Kamera (Mikrofon) und „naher“ Seitenlinie von Minimum 25 m (Luftlinie) bis zu maximal 95 m (Luftlinie). Die Höhe der Plattform über dem Rasen liegt im Bereich von 15 m bis zu 43 m.

Die starken Variationen in der Entfernung, welche durch diese theoretische FIFA-Vorgabe entstehen, sind nun mit Beispielen aus der Praxis abzugleichen. Ziel ist hierbei, einen brauchbaren Durchschnittswert zu ermitteln, der für eine praxisnahe Bestimmung der Strecke von der Kameraplattform zu den in [4.4](#) erwähnten Spielorten taugt.

Als Beispiel eines kompakten, kleineren Stadions wurde die „Volkswagen Arena“ in Wolfsburg in Betracht gezogen. Hier beträgt die Strecke von Kameraplattform bis naher Seitenlinie ca. 34 m (Luftlinie). Die FIFA-Richtlinien in Bezug auf die Perspektive werden erfüllt.

Das „Rhein-Energie-Stadion“ in Köln hat seine Hauptkameraplattform bei Fußballübertragungen in einem horizontalen Abstand von ca. 29 m zur Seitenlinie. Als ungefähre Höhe werden 15 m angenommen. Dies ergibt eine Strecke von Plattformkante zu Seitenlinie von gut 32 m. Die genannten Werte haben eine Position unterhalb der FIFA-Empfehlung zur Folge.

⁹⁵ auch: Floor-Poster

Dies gilt auch für die Münchner „Allianz Arena“. Eine Auswertung der Streckenverhältnisse ergab einen sehr flachen Winkel aufgrund der geringen Kamerahöhe von ca. 11 m über Spielfeldniveau. Trotz des größeren Fassungsvermögens beträgt der Abstand der Führungskamera zur Seitenlinie ebenso nur ca. 32 m (Luftlinie).



Bild 10. Position der Führungskamera in der Münchner „Allianz Arena“. Die Position liegt unterhalb der FIFA-Empfehlung.

Um auch eine Mehrzweckarena in der Auswahl zu haben, wurden maßstäbliche Gebäudeschnitte und Grundrisse des Olympiastadions Berlin untersucht. Durch die das Spielfeld umgebende „Kampfbahn“ für Laufwettbewerbe erhöht sich der horizontale Abstand von Tribünevorderkante zu Seitenlinie auf Höhe der Mittellinie um ca. 25 m. Hinter den beiden Toren steigt der Abstand bis zum ersten Zuschauer auf rund 42 m. Der Innenraum vergrößert sich auf bis zu 180×110 m.⁹⁶ Somit wächst auch die Entfernung zur Hauptkameraposition stark an. Es ergibt sich ein Wert von rund 73 m (Luftlinie) bei einer Kameraposition am „Kontrollraum“, allerdings bei einem flacheren Winkel als von der FIFA gefordert.

In [Anhang C](#) wurden die Informationen zu den Entfernungsverhältnissen durch FIFA-Vorgaben und den Praxisbeispielen grafisch aufbereitet und zusammengefasst.

Die Mittelwertbildung der horizontalen Entfernungen zur Seitenlinie liefert einen Wert von knapp 39 m. Die Höhe der Kameraplattform liegt im Durchschnitt bei ungefähr 19 m. Die direkte Strecke zwischen Schallquelle an der Seitenlinie und Mikrofon auf der

⁹⁶ Vgl. Neufert, S. 476

Kameraplattform beträgt somit ca. 43 m. Die Werte ergeben einen Standpunkt etwas unterhalb des von der FIFA definierten Sektors.

Daraus ergaben sich unten stehende Strecken vom Mikrofon zu den zuvor bestimmten Orten:

Mikrofonstandort	Spielort	Entfernung
„Hauptkamera“	Anstoßpunkt	75 m
„Hauptkamera“	Strafraumgrenze	84 m
„Hauptkamera“	Strafstoß	86 m
„Hauptkamera“	Eckball (gegenüberliegend)	121 m

4.4.2 Standort „Seitenlinie“

Bei der zweiten Betrachtung, die den Standort an der Seitenlinie auf halbem Wege zwischen Mittellinie und Torlinie in Erwägung zieht, sind nur die Abmessungen des Spielfeldes sowie die verfügbaren Flächen neben der Seitenlinie von Interesse. Die Betrachtung der Stadionstruktur kann entfallen.

Die in [4.4.1](#) erläuterte Spielfeldgröße von 105x68 m ist der Ausgangspunkt der anschließenden Streckenermittlung. Zusätzlich gilt es, den Vorgaben der FIFA zu Höhe und Abstand von Werbebanden Beachtung zu schenken. Die Werbebanden sind in der Regel 90 - 100 cm hoch. Zwischen den Begrenzungslinien des Spielfeldes und den Werbebanden sollten an den Seitenlinien Mindestabstände von 4 m gelten ([siehe: Bild 8](#)).⁹⁷

Aufgrund der Höhe der Werbebanden ist es vorteilhaft, das Mikrofon im Bereich zwischen Seitenlinie und Bande zu platzieren. Denn würde das Mikrofon, vom Spielfeld aus gesehen, hinter die Werbebande gestellt, so müsste es im gleichen Zuge auch in einer erhöhten Position betrieben werden. Andernfalls ist die Bande als schallabsorbierende Fläche wirksam. Im Falle eines Reflektormikrofons ([siehe: 6.3](#)), welches sich dann in einer Höhe von mindestens 1 m befindet, werden so jedoch die Sichtlinien des Publikums beeinträchtigt.

⁹⁷ Vgl. FIFA, Fußballstadion, S. 79

Bei der Platzierung vor der Bande muss unter Umständen Rücksicht auf die Werbepartner genommen werden. So könnte das Mikrofon störenden Einfluss auf die Lesbarkeit einer Werbemitteilung nehmen.

Da eine Sichtbeeinträchtigung der Zuschauer nicht akzeptiert werden kann, soll die Position zwischen der Spielerbank und der in Strafraumhöhe aufgestellten Kamera gewählt werden. Ein Platz direkt an der Mittellinie ist mit Blick auf die Spielpraxis (Auswechslung von Spielern, Spielertunnel) unrealistisch.

Das Mikrofon befindet sich somit ca. 26 m von der Mittellinie und 3 m von der Seitenlinie entfernt. In dieser Konfiguration empfiehlt sich die Verwendung zweier Mikrofonsysteme, welche das Spielfeld in zwei Aufnahmebereiche teilen. Das zweite System wird „symmetrisch“ zur Mittellinie auf der „gegnerischen“ Seite des Feldes angebracht. Hierdurch verringern sich die maximalen Entfernungen zu den Schallquellen.

Die ungefähren Strecken (Luftlinie) vom Mikrofon an der Seitenlinie zu den gewählten Spielorten, unter Berücksichtigung der FIFA-Empfehlungen, betragen:

Mikrofonstandort	Spielort	Entfernung
„Seitenlinie“	Anstoßpunkt	43 m
„Seitenlinie“	Strafraumgrenze	35 m
„Seitenlinie“	Strafstoß	37 m
„Seitenlinie“	Eckball (gegenüberliegend)	72 m

4.5 Pegelverhältnisse am Mikrofonstandort

Im Folgenden werden die an den Mikrofonstandorten auftretenden Schalldrücke ermittelt. Dies soll durch die Betrachtung einiger typischer Spielsituationen erfolgen. Der gefundene Durchschnittspegel der verschiedenen Orte und Aktionen dient als Anhaltspunkt für die benötigte Richtwirkung. So lässt sich theoretisch abschätzen, welche Parameter und technischen Erfordernisse das angestrebte Mikrofonsystem mitbringen muss.

Es leuchtet ein, dass die dargestellten Begebenheiten nur für diesen idealisierten Ansatz gültig sind. In der Praxis unterscheiden sich die Austragungsorte deutlich

voneinander. Da der Autor jedoch von eher extremen Verhältnissen ausgeht, dürften die Ergebnisse eine gewisse Relevanz und Tauglichkeit für den praktischen Einsatz haben.

4.5.1 Störpegel

Der Störpegel variiert je nach Spielsituation stark ([siehe: 4.1](#)). Die Entfernungen der auftretenden Störschallquellen hingegen sind konstant. Sie unterliegen nur einer geringfügigen Änderung durch die vorgesehenen Schwenkbewegungen ([siehe: 10](#)) des Mikrofons. Da das verwendete „Störquellenmodell“ ([siehe: 4.1.1](#)) einen in alle Richtungen gleichartigen Störpegel vorsieht, können weitere Betrachtungen des Störschallfeldes vernachlässigt werden.

Die Position des Mikrofons hat nur geringen Einfluss auf den aufgenommenen Störpegel. Der Autor geht von ungünstigen Bedingungen aus und verwendet für die Betrachtungen einen Störpegel von $L_{Stör} = 100\text{dB(A)}$ am Mikrophon ([siehe: 4.1](#)). An den gewählten Standorten ist das Mikrophon von allen Seiten gleichmäßig von Störschall umgeben.

4.5.2 Nutzpegel

Die abgestrahlten Wellenlängen sind erheblich kleiner als die „Raumabmessungen“.⁹⁸ Daher können bei der Betrachtung des Nutzschalls die geometrischen Gesetze Verwendung finden. Wie bereits angedeutet, interessieren aufgrund der Absorption des Publikums nur die Schallanteile, welche das Mikrophon auf direktem Wege erreichen.

Der Schallpegel hängt von der Spielweise in der jeweiligen Entfernung ab. Die Feldgeräusche weisen hierdurch einen großen Dynamikbereich auf. Vorhersagen über die anfallenden Schalldrücke an bestimmten Position des Spielfeldes sind nicht möglich. Es lässt sich lediglich die Wahrscheinlichkeit ausdrücken, dass im Strafraum mehr Schüsse und somit höhere Pegel auftreten als im Mittelfeld. Dort werden zum Großteil Pässe gespielt oder Dribblings vollführt, die in ihrem Schallpegel deutlich unter „wichtigen“ Torschüssen liegen.

⁹⁸ Vgl. Goertz, Beschallungsanlage, Folie 15

Aus diesem Grund werden die Schalldruckpegel typischer Spielaktionen an den in [4.4](#) bestimmten Orten des Spielfelds ermittelt. Die Pegelwerte für die hier betrachteten Spielaktionen betragen in $r_{Mess} = 1$ m Entfernung 80 dB(A) für die Aktion „Pass“ (L_{Pass}) und 90 dB(A) für die Aktion „Torschuss“ (L_{Schuss}) ([siehe: 4.2.1](#)).

Bei der Kombination aus Fußballschuh und Ball handelt es sich um einen angenäherten Kugelstrahler ([siehe: 4.2](#)). Dies bedeutet eine Abnahme des Schalldrucks um 6 dB bei Verdopplung der Entfernung von Spieler zu Mikrofon. Der Schalldruckpegel im Abstand r von der Quelle wird mit L_r bezeichnet. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage des „Abstandsgesetzes“ bei freier Schallausbreitung:

$$L_r = L_{Pass/Schuss} - 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_{Mess}}\right)$$

Es ergeben sich folgende Werte für den geschätzten Schalldruckpegel der Nutzsignale an der Mikrofonposition „Hauptkamera“ auf Grundlage der Entfernungen aus [4.4.1](#):

Mikrofonstandort	Spielort und Aktion	Schalldruckpegel L_r
„Hauptkamera“	Anstoßpunkt, Pass	42,5 dB(A)
„Hauptkamera“	Strafraumgrenze, Pass	41,5 dB(A)
„Hauptkamera“	Strafstoß, Torschuss	51,3 dB(A)
„Hauptkamera“	Eckball (gegenüberliegend), Pass	38,3 dB(A)

Im Durchschnitt entsteht somit ein Pegel von rund $L_{Mittel} = 43,4$ dB(A) Nutzschalldruck an der Position „Hauptkamera“. Die Pegeldifferenz L_{Diff} zum Störschall beträgt:

$$L_{Diff} = L_{Stör} - L_{Mittel}$$

Somit liegt der Nutzschall am Mikrofon im Mittel 56,6 dB(A) unter dem allseitig vorherrschenden Störschall.

Für die zweite Mikrofonposition „Seitenlinie“ ergeben sich folgende Werte:

Mikrofonstandort	Spielort und Aktion	Schalldruckpegel L_r
„Seitenlinie“	Anstoßpunkt, Pass	47,3 dB(A)
„Seitenlinie“	Strafraumgrenze, Pass	49,1 dB(A)
„Seitenlinie“	Strafstoß, Torschuss	58 dB(A)
„Seitenlinie“	Eckball (gegenüberliegend), Pass	42,8 dB(A)

Der Durchschnittspegel an der Position „Seitenlinie“ beträgt somit $L_{Mittel} = 49,3$ dB(A). Daraus ergibt sich eine Differenz zwischen Nutz- und Störsignal von $L_{Diff} = 50,7$ dB (A).

Das Nutzsignal unterscheidet sich an den beiden Standorten also um durchschnittlich knapp 6 dB(A). Dies entspricht aus „Sicht“ der Schallquelle einer ungefähr verdoppelten Wegstrecke zwischen den jeweiligen Mikrofonstandorten.

Zur besseren Einordnung der ermittelten Werte für den Leser soll hier folgende Information gegeben werden: Der Schalldruckpegel, den ein in „normaler“ Lautstärke sprechender Mensch in 1 m Entfernung erzeugt, liegt bei ca. 60 dB(A).⁹⁹

4.5.3 Bedämpfung durch Luft

Neben der entfernungsabhängigen Abnahme ([siehe: 3.1.1](#)) soll ebenso die, wegen der großen Wegstrecken des Schalls, durch Luftabsorption entstehende Bedämpfung höchster Frequenzen bedacht werden.

Wie der Tabelle auf nachfolgender Seite zu entnehmen ist, kann die Luftdämpfung der hohen Frequenzen große Werte annehmen. Der „Höhenverlust“ wird mittels elektronischer Filterung des Mikrofonsignals wieder ausgeglichen.

Für weite Strecken muss daher das Ergebnis der „geometrischen Schalldruckabnahme“ in bestimmten Frequenzbereichen korrigiert werden. Der Nutzsoll erfährt so eine weitere Schwächung.

⁹⁹ Vgl. Heckl, S. 98

An der Position „Hauptkamera“ können Entfernungen zwischen Schallquelle und Mikrofon von 100 m und mehr vorkommen ([siehe: 4.4.1](#)). Die unten aufgeführten Zahlen können eine Orientierung sein, wie stark höhere Spektren beeinflusst werden.

temperature (50 % humidity)	additional attenuation per 100 m		
	3000 Hz	6000 Hz	10.000 Hz
20° C	2 dB	7 dB	15 dB
10° C	3 dB	11 dB	22 dB

Bild 11. Pegelabnahme für hohe Frequenzbänder durch Luftabsorption.

In den im Rahmen dieser Ausarbeitung vorgenommenen Abschätzungen zum Nutzschaall wurde die Luftabsorption nicht weiter berücksichtigt. Die eher unvorteilhaften Entfernungsangaben sowie die Annahme eines hohen Störpegels sollten die Praxistauglichkeit bereits sicherstellen. Es erfolgte daher keine detaillierte rechnerische Betrachtung der Luftabsorption.

Beim Standort „Seitenlinie“ ([siehe: 4.4.2](#)) kann die Bedämpfung hochfrequenter Schallanteile durch Luft aufgrund von Entfernungen < 100 m vernachlässigt werden.

4.6 Anforderungen an das Mikrofonsystem

Aus den getätigten Betrachtungen zu Akustik und Stadionumfeld geht hervor, welche Eigenschaften das Mikrofon mitbringen sollte.

Einerseits ist, wie nicht anders zu erwarten, die Richtwirkung bzw. der schmale Öffnungswinkel für frontal einfallenden Direktschaall sehr bedeutend.

Wäre unser Mikrofon eine Kugel, die allseitig gleichempfindlich für Schalldruckänderungen ist, so würde der Störschaall den Nutzschaall unter den angenommenen Bedingungen um Minimum ca. 50 dB(A) überwiegen (Standort Seitenlinie). Das Verhältnis der beiden Komponenten lässt sich aber durch das Hinzufügen einer Richtwirkung ändern.

Würde das Mikrofonsystem ein Bündelungsmaß von 50 dB erreichen, so wäre der Pegel des Mikrofonsignals für Nutz- und Störschaall messtechnisch gleich. Objektiv hebt sich der „Kick“ also noch nicht merklich aus dem Störschaall ab. Subjektiv sollte das Feldgeräusch jedoch ein Hörereignis auslösen, da es sich in seiner spektralen Zusammensetzung vom „unkorrelierten Publikumsrauschen“ absetzt. Inwiefern das

Feldgeräusch in einer solchen Situation aber wirklich hörbar ist, müssen Hörtests klären.

Bündelungsmaße gängiger Richtcharakteristika wurden in [5.3](#) zusammengestellt. Es wird ersichtlich, welche „anspruchsvolle“ Forderung ein Bündelungsmaß von 50 dB bedeutet. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden zwei hochrichtende Mikrofontypen getestet. Ein Vergleich deren Bündelungsmaße zeigt [Kapitel 7.4.5](#).

Aus den Analysen des Störschalls können ebenso Anforderungen an das Mikrofonsystem formuliert werden. Die höchsten Störpegel treten im Bereich zwischen 250 Hz bis 2 kHz auf. Hier sollte das Mikrofonsystem den Störschall am effektivsten unterdrücken.

Betrachtet man das Gebiet der Nachführung des Mikrofons, besteht die Möglichkeit hier Anforderungen an die benötigte „Winkelgeschwindigkeit“ des Drehmotors zu formulieren. Diese kann aus den Entfernungen sowie den Laufgeschwindigkeiten der Spieler ermittelt werden ([siehe: 10.2.1](#)). Die Thematik der Nachführung streift, wie eingangs erwähnt, die Arbeit nur am Rande. Sie wird in einer separaten Ausarbeitung zu betrachten sein.

Nicht zuletzt sind wir nun in der Lage, Aussagen über die zulässigen Abmessungen des verwendeten Mikrofonsystems zu treffen. Dies ist für eine „unkomplizierte“ Einführung des Systems nicht ganz unbedeutend.

5 Mikrofontheorie

Nach kurzer Beschreibung elementarer Funktionsweisen wird ausführlicher auf die Darstellung von Techniken zur Erzeugung einer Richtwirkung eingegangen. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die Thematik „Richtwirkung“ für das gesamte Projekt eine entscheidende Rolle spielt.

5.1 Empfängerprinzipien

Aufgabe des Mikrofons ist die Umwandlung von Schallenergie in elektrische Energie. Genauer handelt es sich um eine Membran, die vom Schall in Bewegung versetzt wird.¹⁰⁰ Das Empfängerprinzip gibt an, auf welche Schallfeldgröße das Mikrofon reagiert und gibt somit Auskunft über die Richtcharakteristik.¹⁰¹

5.1.1 Druckempfänger

Schalldruckempfänger sind stets ungerichtete Mikrofone. So lange die Mikrofonabmessungen klein gegenüber der aufzunehmenden Schallwellenlänge sind, ist das Mikrofon für alle Schalleinfallrichtungen in gleicher Weise empfindlich.¹⁰² Beim Druckempfänger ist nur die Vorderseite der Membran dem Schallfeld ausgesetzt.¹⁰³ Dieser Unterschied zwischen äußerem Wechseldruck und dem konstanten Druck des abgeschlossenen Raumes hinter der Membran verursacht die Bewegung des Membranmaterials.

Vorteilhaft bei Druckempfängern ist die geringe Windempfindlichkeit. Denn ein Druckempfänger muss zur Aufnahme tiefer Frequenzen nicht tief abgestimmt sein.¹⁰⁴

5.1.2 Druckgradientenempfänger

Druckgradientenempfänger sprechen auf den Unterschied der Schalldrücke an, die in jedem Augenblick an zwei wenig voneinander entfernten Punkten im Schallfeld

¹⁰⁰ Vgl. Zollner, S. 181

¹⁰¹ Vgl. Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik, S. 82

¹⁰² Vgl. ebd., S. 82

¹⁰³ Vgl. Boré, S. 11

¹⁰⁴ Vgl. Wuttke, S. 64

wirksam sind.¹⁰⁵ Zu diesem Zweck ist die Mikrofonmembran beidseitig für die Druckschwankungen des Schallfeldes zugänglich. Die Druckdifferenz zwischen Membranvorderseite und -rückseite steigt bei gleichbleibendem Schalldruck und Abstand mit wachsender Frequenz an.¹⁰⁶ Ist der Abstand zwischen beiden Membranseiten gleich der halben Wellenlänge, so ist die Druckdifferenz maximal.¹⁰⁷ In „reiner“ Form besitzen Gradientenempfänger stets eine Richtwirkung mit „Acht-Charakteristik“. Sie kann durch hinzufügen von Laufzeitgliedern ([siehe: 5.2.3](#)) variiert werden.

5.2 Richtwirkung von Mikrofonen

Die Richtwirkung gängiger Mikrofone beruht alleine darauf, dass Schall aus anderen Richtungen als „von vorne“ mehr oder minder unterdrückt wird.¹⁰⁸ Im reflexionsarmen Raum kann man mit einer Kugel genauso gut „entfernte“ Schallquellen aufnehmen wie mit einem beliebig starken Richtmikrofon. Erst durch den reflektierten Schall und den störenden Umgebungsschall aus anderen Richtungen ergibt sich die Existenzberechtigung von Richtmikrofonen.¹⁰⁹

5.2.1 Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik eines Mikrofons ist frequenzabhängig.¹¹⁰ Sie gibt in einem so genannten „Polarkoordinatendiagramm“ für verschiedene Frequenzen an, wie groß die Dämpfung in der jeweiligen Richtung gegenüber der 0°-Richtung ist. Das Richtdiagramm gilt nur für den direkten Schall, also das freie Schallfeld.¹¹¹ Des Weiteren gelten Richteigenschaften von Mikrofonen nur, solange der direkte Schallanteil überwiegt. Andernfalls wird die Richtwirkung mit wachsendem Abstand geringer.¹¹²

¹⁰⁵ Vgl. Boré, S. 11

¹⁰⁶ Vgl. ebd., S. 12

¹⁰⁷ Vgl. ebd., S. 13

¹⁰⁸ Vgl. Wuttke, S. 72

¹⁰⁹ Vgl. ebd., S. 94

¹¹⁰ Vgl. Boré, S. 20

¹¹¹ Vgl. Wuttke, S. 71

¹¹² Vgl. Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik, S. 82

5.2.2 Richtwirkung von Druckmikrofonen bei hohen Frequenzen

Bei hohen Frequenzen geht die Kugelcharakteristik von Druckempfängern allmählich in eine einseitige Richtcharakteristik über.¹¹³

Für frontal einfallenden Schall, dessen Wellenlängen im Bereich der Membranabmessungen liegen, entstehen Reflexionen. Dadurch erhöht sich der Schalldruck vor dem Mikrofon. Das Mikrofon wird so einen höheren Schalldruck bei hohen Frequenzen abgeben, als er im Schallfeld ohne Mikrofon eigentlich vorhanden ist.¹¹⁴ Dieser, auch „Druckstau“ genannten, Erscheinung begegnet man mit so genannten „freifeldentzerrten“ Mikrofonen. Dabei wird die an der Membran angefallene Verstärkung hoher Frequenzen durch einen Schaltkreis elektronisch kompensiert. Das Mikrofon besitzt somit einen „Freifeldfrequenzgang“. Durch die „Freifeldentzerrung“ eignet sich das Mikrofon für die Anwendung im Nahfeld einer Schallquelle, wo frontal einfallender Direktschall überwiegt. Es ergibt sich eine annähernd lineare Frequenzwiedergabe.

Eine entscheidende Rolle für die Richtwirkung von Kugelmikrofonen spielen auch die Abmessungen des Mikrofons. Denn durch das Mikrofongehäuse gelangen von hinten kommende Schalldruckänderungen nicht mehr bis zur Membran. Sie werden zuvor vom Gehäuse reflektiert. Es bildet sich ein „Schallschatten“.¹¹⁵

Dies führt bei Platzierung des Mikrofons im diffusen Schallfeld zu einem „dumpfen“, „höhenarmen“ Klangbild. Der so genannte Diffusfeld-Frequenzgang gilt für den Schall, der annähernd gleich stark aus allen Raumrichtungen auf das Mikrofon trifft.¹¹⁶ Speziell „diffusfeldentzerrte“ Mikrofone verfügen über eine integrierte „Höhenanhebung“ des Mikrofonsignals. So werden die durch Abschattung des Gehäuses bedämpften Frequenzen elektronisch verstärkt. Auch hier ist das klangliche Ergebnis eine lineare Wiedergabe bei Verwendung des Typs im Diffusfeld. Überwiegen frontale Schallanteile, klingt das Mikrofon sehr „höhenbetont“.

Von Mikrofonen wird allgemein gefordert, dass ihr Freifeld- und Diffusfeldfrequenzgang annähernd parallel verlaufen. Hierdurch soll erreicht werden,

¹¹³ Vgl. Boré, S. 20

¹¹⁴ Vgl. Brüel & Kjaer, Measuring Microphones, S. 17

¹¹⁵ Vgl. Zollner, S. 189

¹¹⁶ Vgl. Boré, S. 22

dass seitlich postierte Schallquellen zwar leiser, jedoch nicht mit anderem Frequenzgang aufgenommen werden.¹¹⁷

Bei seitlichem Schalleinfall kommt das „Interferenzprinzip“ zum tragen.¹¹⁸ Hier wird seitlicher Schall durch Interferenzen innerhalb der Membran abgeschwächt.

Denn schräg ankommende Schallwellen treffen mit unterschiedlichen Phasenlagen auf die einzelnen Membranzonen. Der Interferenzeffekt engt die Richtcharakteristik bis auf „Keulenform“ ein.¹¹⁹

5.2.3 Laufzeitglieder

Ein gängiges Prinzip zum Erzielen bestimmter Richtwirkungen ist die Kombination eines Druckgradientenempfängers mit so genannten Laufzeitgliedern. Sie nehmen Einfluss auf die Druckdifferenz des Schalls zwischen den beiden Membranseiten. So muss der Schall zunächst das Laufzeitglied „durchwandern“, bevor er die Membran erreicht. Hierdurch gelangt ein Schallanteil verzögert an die Membran. Es ist, als wäre der Abstand zwischen Membravorderseite und -rückseite größer.

Diese „Variation“ des Abstandes führt zu unterschiedlichen „Interferenzeffekten“ an der Membran. Somit lässt sich Schall aus bestimmten Richtungen gezielt bedämpfen.

5.2.4 Richtwirkung durch ein Mikrofonarray

Bei einem Mikrofonarray handelt es sich um eine Kombination mehrerer Mikrofone zur Aufnahme des gleichen Schallereignisses. Die Kombination der Mikrofone kann in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen passieren. Meist sind die Mikrofone in einer Ebene linien- oder kreisförmig angebracht.

Der Grundgedanke ist die „Zusammenschaltung“ mehrerer Mikrofone. Durch zeitliche Verzögerungen einzelner Mikrofonsignale und anschließendes summieren aller Signale entstehen Auslöschungen bzw. Bedämpfungseffekte. Auf diese Art reduzieren sich nicht erwünschte Geräusche aus anderen Richtungen als der des „Nutzsignals“.

¹¹⁷ Vgl. Boré, S. 23

¹¹⁸ Vgl. Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik, S. 82

¹¹⁹ Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 164

Um mit den in einer bestimmten Anordnung platzierten Mikrofonen eine Richtwirkung zu erzielen ist es notwendig, die einzelnen Arraymikrofone durch eine nachgeschaltete Signalverarbeitung zu verbinden. Es erfolgt eine Signalanalyse aller Mikrofonensignale und daraus hervorgehend eine Berechnung der Laufzeitunterschiede zwischen dem Ort der Schallquelle und den jeweiligen Mikrofonstandpunkten.

Die unterschiedlichen Laufzeiten des Schalls zu den Mikrofonelementen können dann durch die zuvor ermittelten Zeitdifferenzen in ausgewählten Audiosignalen korrigiert werden. Die „zeitkorrigierten“ Signale aller Mikrofone unterzieht man darauf einer „Summierung“.

Durch dieses „zeitversetzte zusammenmischen“ der einzelnen Mikrofonensignale entstehen Interferenzauslöschungen für Schalle aus anderen Richtungen als die der „fokussierten“ Schallquelle. Das Array bildet daher eine Richtung bevorzugter Empfindlichkeit aus.

Die Richteigenschaften der einzelnen Mikrofone fügen sich zu einer gemeinsamen Richteigenschaft des gesamten Arrays zusammen. Diese Richtwirkung hängt von der Gewichtung der einzelnen Mikrofone im Summensignal des Arrays ab.

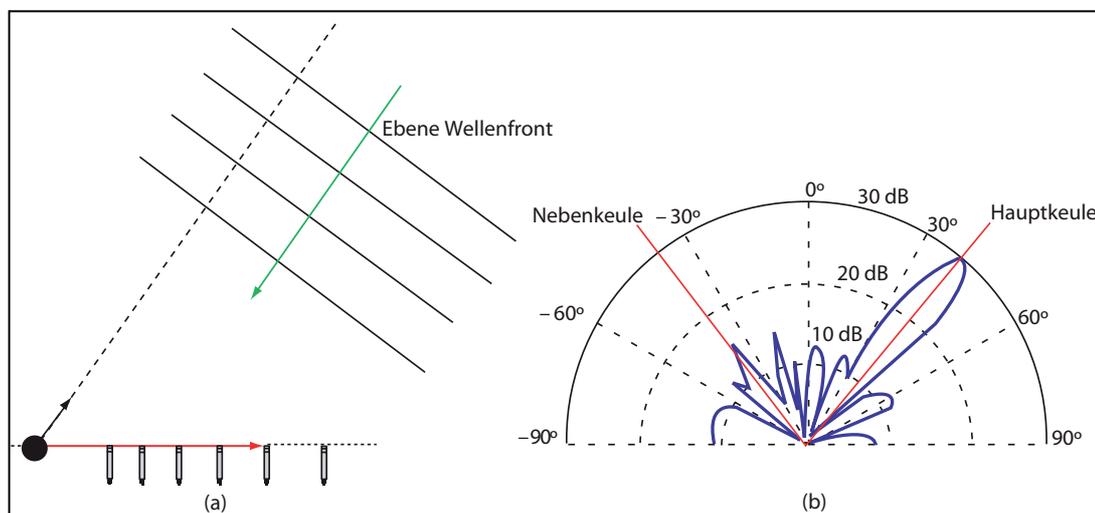


Bild 12. a) Einfall einer ebenen Wellenfront auf ein Array. Die einzelnen Mikrofonensignale werden von einer nachfolgenden Signalverarbeitung in ihrer Phase und Amplitude korrigiert. Schallanteile aus der gewählten Richtung des „Nutzsignals“ werden phasenrichtig aufsummiert. Für Schall aus anderen Richtungen ergeben sich Phasenunterschiede und daraus resultierende Bedämpfungen.

b) Richtdiagramm eines Arrays mit Hauptkeule in „Fokusrichtung“ und Nebenkeule in andere Richtungen.

Der Einsatz eines Mikrofonarrays bietet den Vorteil, die Richtwirkung variabel gestalten zu können. Befindet sich der Spieler nahe am Spielfeldrand, ist eine „Aufweitung“ der Richtcharakteristik möglich. Der Klangeindruck ist durch die Einbeziehung des Umfeldes „räumlicher“. Entfernt sich die „Schallquelle“, wird die Hauptkeule des Arrays wieder verschmälert. Außerdem kann eine mechanische Nachführung durch die Signalverarbeitung, welche ein „elektronisches Schwenken“ der Richtwirkung ermöglicht, ersetzt werden.

Von Nachteil bei der Zusammenschaltung vieler einzelner Mikrofone zu einem Array sind die sich summierenden „Rauschpegel“ der jeweiligen Schallempfänger. Durch hohes Rauschen wird der Dynamikbereich eines Arrays stark eingeengt. In der nachfolgenden Signalbearbeitung kann das „Rauschen“ zwar verringert werden, allerdings auf Kosten der Signaldynamik. Die einzelnen Mikrofonelemente sollten daher einen guten Geräuschpegelabstand vorweisen.

Des Weiteren ist eine Implementierung dieser Technik komplex und fordert einen hohen Programmieraufwand zur Optimierung der Signalverarbeitung. Dies ist auch der Grund für den hohen finanziellen Aufwand und die teuren Anschaffungspreise, welche mit Entwicklung und Erwerb eines solchen Systems verbunden sind.

Die „Arraytechnik“ wird daher im Rahmen dieser Schrift nur am Rande gestreift. Es soll zunächst ein Ansatz mit einer kostengünstigeren Variante, welche ähnlich hohe Richteigenschaften wie ein Array bietet, verfolgt werden.

Beispiele für Arraymikrofone sind das „AT895“ ([siehe: 6.2](#)), das „Audioscope“-System ([siehe: 6.4](#)), das „KEM970“ oder auch das „Sanken CS3-e“.

Arraysysteme, welche die Möglichkeit der variablen Gestaltung der Richtwirkung bieten, werden auch als „Beamforming“-Systeme bezeichnet.

5.3 Das Bündelungsmaß

Das Bündelungsmaß kennzeichnet die Richtwirkung eines Mikrofons.¹²⁰ Es zeigt an, wie viel der Pegel des Richtmikrofons im Diffusfeld unter dem einer allseitig empfindlichen Kugel liegt.¹²¹ So kann eine Aussage über die Differenz der

¹²⁰ Vgl. Zollner, S. 85

¹²¹ Vgl. Sengpiel, Bündelungsgrad und Bündelungsmaß der Mikrofone

Frequenzgänge im direkten und im diffusen Schallfeld getroffen werden.¹²² Das Bündelungsmaß ist frequenzabhängig.¹²³

Diffuser Schall wird also mit einer um das Bündelungsmaß reduzierten Empfindlichkeit aufgenommen.

Somit kann das Bündelungsmaß als Unterschied zwischen dem Freifeld-Übtragsmaß und dem Diffusfeld-Übtragsmaß bezeichnet werden.¹²⁴

Ein Kugelmikrofon besitzt ein Bündelungsmaß von 0 dB. Daraus ergibt sich ein so genannter „Entfernungsfaktor“ von 1. Bei Verbesserung des Bündelungsmaßes um 6 dB kann bei konstantem Diffusschallpegel der Abstand zur kugelförmig strahlenden Schallquelle verdoppelt werden („Entfernungsfaktor“ 2). Das Verhältnis zwischen Direkt- und Diffusschall bleibt dabei gleich.¹²⁵

Die unten stehende Tabelle zeigt die Bündelungsmaße gängiger Richtcharakteristiken sowie deren „Entfernungsfaktoren“:^{126,127}

Richtcharakteristik	Bündelungsmaß (dB)	Entfernungsfaktor
Kugel	0	1
Acht	4,77	1,73
Niere	4,77	1,73
Superniere	5,72	1,93
Hypernieren	6,02	2
Keule	bis zu 10,37	bis zu 3,3

Auf unser Projekt bezogen ist das Bündelungsmaß eine wichtige Größe. Denn wie die akustischen Betrachtungen zeigen, benötigen wir ein System mit hoher Unterdrückung der diffusen Schallanteile, also einem hohen Bündelungsmaß.

¹²² Vgl. Wuttke, S. 52

¹²³ Vgl. ebd., S. 40

¹²⁴ Vgl. Boré, S. 23

¹²⁵ Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 161

¹²⁶ Werte entnommen aus: Sengpiel, Bündelungsgrad und Bündelungsmaß der Mikrofone

¹²⁷ Werte entnommen aus: Dickreiter, Band 1, S. 161

6 Mikrofonsysteme mit hoher Richtwirkung

Im Folgenden gibt der Autor einen Überblick zu Mikrofonen mit ausgeprägten Richteigenschaften. Die Funktionsweisen der unterschiedlichen Systeme werden dargestellt. Die grundsätzlichen Techniken zur Umsetzung einer Richtwirkung wurden im letzten Kapitel behandelt.

Hier erfolgt eine Spezialisierung auf Mikrofone, bei deren Entwicklung an erster Stelle das Erzielen einer hohen Richtwirkung stand. Zudem handelt es sich um Mikrofontypen, die in der momentanen Audioproduktion von Sportevents eingesetzt werden. Da das System praxisnah entwickelt werden soll, ist es bedeutend, die aktuell verwendete Technik zu kennen.

Es gilt zu klären, ob die bestehenden Systeme als Ausgangspunkt für unsere Entwicklung nutzbar sind.

6.1 Das Richtrohrmikrofon

Zu Beginn des Projekts war unser Ansatz, die Nachführung mittels „normalen“ Richtrohrmikrofonen zu realisieren. Schließlich ist es der am häufigsten eingesetzte Mikrofontyp, wenn es um „Fernsehton“ geht. International wird dieses Mikrofon auch als „Shotgun Microphone“ oder „Line Microphone“ bezeichnet. Durch seine hohe Richtwirkung ist es geeignet für den Einsatz in „lärmerfüllter“ Umgebung. Aus der bewährten Nutzung des Mikrofons heraus wurde daher eine Marktübersicht durchgeführt und die Eignung für unsere Zwecke abgewogen.

6.1.1 Funktionsweise

Im Prinzip handelt es sich um einen Druckgradientenempfänger ([siehe: 5.1.2](#)) mit einem die Richtwirkung verbessernden Rohrvorsatz.¹²⁸ Das vorgesetzte Rohr verfügt über seitliche Schlitze und Öffnungen.

Jeder Schlitz ist die Quelle einer Schallwelle, die im Rohr zur Membran läuft. Bei seitlichem Schalleinfall kommt es zu Auslöschungen, bei achsparallelem Einfall zu Verstärkungen.¹²⁹ Aus diesen Überlagerungen und Interferenzen der Wellen folgt auch die Bezeichnung „Interferenzempfänger“.

¹²⁸ Vgl. Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik, S. 97

¹²⁹ Vgl. Zollner, S. 196

Wie bei jedem Richtmikrofon ist es für eine gewinnbringende Verwendung wichtig, dass genügend Direktschall ankommt.¹³⁰

Die Richtwirkung von Interferenzrohren ist stark an die Frequenz gebunden. So wird die keulenförmige Richtcharakteristik erst zu hohen Frequenzen hin wirksam. Tatsächlich richten Richtrohre sogar nur bei hohen Frequenzen, z.B. oberhalb 5 kHz, stärker als Supernieren.¹³¹

Seitlicher Direktschall sowie Diffusschall wird vom Richtrohr oft deutlich in der Klangfarbe verändert. Bewegen sich Objekte aus der Zone höchster Empfindlichkeit heraus, kann die wechselnde Klangfarbe zu „unangenehmen“ Hörereignissen führen. Grund hierfür sind die beschriebenen Phasenauslöschungen, welche seitliche Wellen innerhalb des Richtrohres erfahren.

Durch eine gesteigerte Länge des Interferenzrohres erhöht sich die Richtwirkung bei hohen Frequenzen. Gleichzeitig steigert sich der Bereich, in welchem der Interferenzeffekt zum Tragen kommt, zu tiefen Frequenzen.

Der für das Erreichen des Projektzieles wichtige Wert des Bündelungsmaßes ist bei Richtrohrmikrofonen stark frequenzabhängig. Für tiefe Frequenzen, bei denen das Richtrohr noch keinen Effekt zeigt, liegt es bei ca. 4,8 dB. Bei hohen Frequenzen steigt es bis auf ca. 10,4 dB.¹³²

6.1.2 Marktübersicht und Tauglichkeit für das Projekt

Zur Erstellung der Übersicht wurden Datenblätter und technische Werte verglichen. Dabei war bald abzusehen, dass die erzielbaren Richtwirkungen für unsere Zwecke nicht ausreichten. Diese Vermutungen bestätigten sich in den akustischen Betrachtungen. Die geforderten Werte in Bezug auf Richteigenschaften und Dämpfung von diffus einfallendem Schall können mit dieser Technik nicht erreicht werden. Auch der Gedanke, die Richtwirkung durch Nachführung zur Schallquelle zu verbessern führte aufgrund des zu geringen Bündelungsmaßes ([siehe: 5.3](#)) dieser Mikrofontechnik zu keinem Ergebnis.

¹³⁰ Vgl. Dickreiter, Mikrofonaufnahmetechnik, S. 97

¹³¹ Vgl. Wuttke, S. 95

¹³² Vgl. Dickreiter, Band 1, S. 161

Besonderes Augenmerk lag auf den derzeit bei Fußballproduktionen eingesetzten Mikrofontypen. Zur Aufnahme der Feldgeräusche kommen vorwiegend die Modelle Sennheiser MKH 416 sowie Sennheiser MKH 816 zum Einsatz. Zur Aufnahme der Publikumsatmo Sennheiser MKH 416 und MKH 60.¹³³ Weiter findet auch der Typ Sennheiser ME 66 Verwendung.¹³⁴

Im Anhang befinden sich die Bezeichnungen der in die Übersicht aufgenommenen Richtrohrmikrofone sowie Polarkoordinatendiagramme der aktuell verwendeten Mikrofone ([siehe: Anhang D](#)).

6.2 Das „Super Shotgun“ Audio Technica 895

Eine Besonderheit unter den Richtrohrmikrofonen stellt das „Audio Technica 895“ („AT895“) dar. Im Gegensatz zu „gewöhnlichen“ Interferenzempfängern, deren Richteingenschaften rein auf akustischen Prinzipien beruhen, erzeugt das „AT895“ seine Richtwirkung zusätzlich durch digitale Signalverarbeitung. Das Mikrofon greift zum Teil auf die beschriebene Arraytechnik zurück. Es finden hierzu 5 Mikrofonelemente Verwendung.

6.2.1 Funktionsweise

Das Mikrofon besitzt eine nach vorne ausgerichtete „Hauptkapsel“ sowie vier weitere Kapseln, die nach hinten ausgerichtet sind. Diese nehmen den eigentlich unerwünschten Schall auf. Die „Hauptkapsel“ ist ein Druckgradientenempfänger in Nierencharakteristik mit vorgeseztem Interferenzrohr. Bei den übrigen, nach „hinten“ ausgerichteten Kapseln handelt es sich ebenfalls um Nierenmikrofone. Die von den 5 Membranen aufgenommenen Schallinformationen werden an die in einem separaten Gehäuse befindliche DSP-Schaltung¹³⁵ weitergeleitet. Die Schaltung analysiert die Signale der einzelnen Kapseln. Aus den Signalen der 4 „nach hinten“ gerichteten Membranen erstellt die Schaltung einen „Fingerabdruck“ der Störgeräusche. Anschließend werden jene Anteile aus dem Signal der „Hauptkapsel“ möglichst entfernt, welche identisch mit den von hinten einfallenden Schallsignalen sind.

¹³³ F. Rathgeber, Toningenieur ZDF

¹³⁴ J. Hegele, Toningenieur Plazamedia

¹³⁵ DSP-Schaltung = Schaltkreis zur digitalen Signalbearbeitung

Die digitale Signalverarbeitung ermöglicht ein wechseln der Richtcharakteristik. Neben der Einstellung für hohe Richtwirkung, die i.d.R. verwendet wird, ist das Mikrofon auf eine „scheibenförmige“ sowie eine „kugelförmige“ Vorzugsrichtung einstellbar.¹³⁶

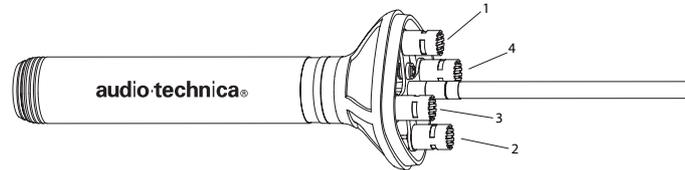


Bild 13. „AT 895“ mit den Wandlern 1-4 zur Aufnahme des „Störschalls“ sowie der mit einem Interferenzrohr verbundenen „Hauptmembran“.

6.2.2 Einsatzgebiete

Auf eine „Stadionsituation“ übertragen kann diese Technik helfen, die Spielgeräusche von den übrigen Zuschauer- bzw. Stadionsgeräuschen zu separieren. Zudem könnte auf die Verwendung eines etwas sperrigen und mechanisch empfindlichen „Parabilmikrofons“ ([siehe: 6.3](#)) verzichtet werden.

Das „AT895“ wurde in der Vergangenheit bereits bei verschiedensten Sportwettbewerben eingesetzt. So zeigt das unten stehende Bild die Verwendung bei den olympischen Schwimmwettbewerben in Athen 2004.



Bild 14. „AT895“ mit Windschutz auf einem Kameraschlitten bei den olympischen Spielen 2004.

¹³⁶ Vgl. AT895 - Installation and Operation

Auch bei Wintersportübertragungen und im Baseball kommt das „AT895“ zum Einsatz. Im Fußball wird das Mikrofon bei internationalen Wettbewerben sowie bei Produktionsfirmen anderer Länder benutzt.¹³⁷ Meist wird das Mikrofon „händisch“ von einem Tonassistenten der Schallquelle nachgeführt. In der Bundesliga findet dieser Typ keine Verwendung.

Aufgrund seiner viel versprechenden Funktionen und Vorteile wollten wir das „AT895“ näher unter die Lupe nehmen. Zunächst erscheint dieses Mikrofon durch seine geringe Größe ideal, um mittels eines speziellen Drehmotors der Schallquelle nachgeführt zu werden. Näheres zum Test und den zugehörigen Ergebnissen wurde in [Kapitel 7](#) zusammengestellt.

6.3 Das „Parabolkmikrofon“

Beim so genannten „Parabolkmikrofon“ handelt es sich um ein Reflektormikrofon. Darunter wird die Kombination eines Mikrofons mit einer reflektierenden Paraboloidenform verstanden, welche den Schalldruck an der Mikrofonposition konzentrieren und durch die so entstehenden Überlagerungen an der Membran erhöhen soll. Wie sich noch zeigen wird, hat diese Mikrofonvariante sehr ausgeprägte Richteigenschaften. Sie ist deshalb hochinteressant für die Fortführung unseres Projekts.

In den nachstehenden Zeilen wird detailliert auf diese Technik eingegangen. Grundlegend sind die Beschreibungen zum Parabolreflektor aus [3.3.2](#).

6.3.1 Verstärkungseigenschaften des Parabolreflektors

Wie in [3.3.2](#) erwähnt, muss der Durchmesser eines Reflektors mindestens die Wellenlänge der zu bündelnden Schallwelle betragen.

Durch den Reflektor vergrößert sich in dessen „Fokus“ die Amplitude des Schallfeldes im Gegensatz zum freien Schallfeld. Dieser Effekt wird als „akustische Verstärkung“ bezeichnet.¹³⁸ Der Reflektor verändert also die Druckverteilung des Schallfeldes, er greift „aktiv“ in die Verhältnisse im Schallfeld ein.¹³⁹

¹³⁷ Vgl. Baxter, S. 183

¹³⁸ Vgl. Backman, S. 1

¹³⁹ Vgl. ebd., S. 2

Zur Beschreibung des Systems aus Mikrofon und Parabolreflektor verwendet man folgende Größen¹⁴⁰:

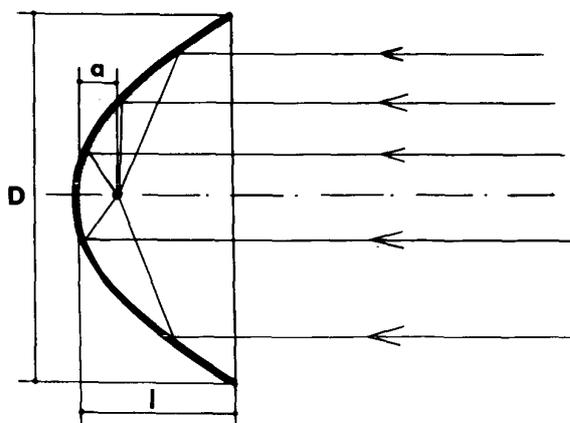


Bild 15. Bündelung durch den Parabolreflektor.

- a = Entfernung des Scheitels von „Fokus“ bzw. Mikrofon
- l = Entfernung des Scheitels von der „Öffnungsebene“
- D = Durchmesser der Öffnung

Mit diesen Variablen besteht die Möglichkeit, das Verhalten des „Parabilmikrofons“ im Schallfeld theoretisch abzuschätzen. Das Verhältnis von l zu a bestimmt bei gleichbleibendem Durchmesser D über die erzielbare Verstärkung.

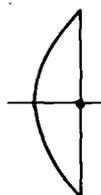


Bild 16. Reflektor mit einem Verhältnis von $l/a = 1$.

Die Bündelungswirkung hängt jedoch nicht nur vom Durchmesser, sondern auch von der Form der „Rotationsparabel“ ab. Unter „Form“ wird hier die Krümmung der Parabel verstanden. Unter Beibehaltung des Durchmessers der Öffnung wird die Parabel mit zunehmender „Krümmung“ tiefer. Der Parameter l steigt somit an. Da der Fokus nun tiefer in der Parabel liegt, ist der Wert von a klein im Vergleich zu l . Wie [Bild 17](#) zeigt, ist mit steigendem Wert des Ergebnisses aus l/a eine zunehmende Verstärkung möglich.

¹⁴⁰ Vgl. Wahlström, S. 418

Die Verstärkung im „Brennpunkt“ eines Parabolreflektors lässt sich theoretisch berechnen¹⁴¹:

$$F_p = \sqrt{1 + \left[4\pi \frac{a}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{l}{a}\right) \right]^2 + 8\pi \frac{a}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{l}{a}\right) \sin 4\pi \frac{a}{\lambda}}$$

Die Funktion ergibt den Verstärkungsfaktor F_p im „Brennpunkt“. Sie ist gültig für Schall, welcher parallel zur Achse einfällt. Der Verstärkungsfaktor beschreibt das Verhältnis des gesamten Schalldrucks p_a am Mikrofon zum einfallenden Schalldruck p_i .¹⁴² Gemäß der unten stehenden Formel kann so aus dem auf den Reflektor treffenden Schalldruck der theoretische Pegelwert nach Reflexion und Bündelung ermittelt werden:

$$p_a = F_p \cdot p_i$$

Zur Darstellung der Verstärkungseigenschaften in Schaubildern ist es hilfreich, die Verstärkung nicht als Funktion der Frequenz zu definieren. Wird stattdessen das Verhältnis von einfallender Wellenlänge λ zu „Brennweite“ a verwendet, lässt sich für eine bestimmte Kombination aus Reflektor und Mikrofonabstand (l/a) die Verstärkung in dB ablesen.¹⁴³ Die relativen Angaben machen ersichtlich, welchen Einfluss die Größe eines Reflektors allgemein hat.

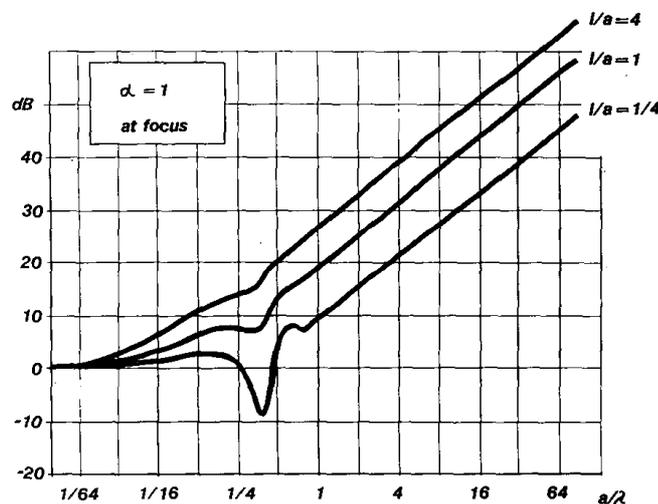


Bild 17. Theoretische Verstärkung eines Parabolmikrofons. Ab einem Verhältnis von $a/\lambda > 1$ beträgt die Verstärkung 6 dB pro Oktave. Je größer der l/a -Wert, umso höher die maximal erzielbare Verstärkung.

¹⁴¹ Vgl. Wahlström, S. 427

¹⁴² Vgl. Backman, S. 2

¹⁴³ Vgl. Wahlström, Fig. 5, S. 420

Die Verstärkung des Reflektors ist frequenzabhängig und steigt zu hohen Frequenzen hin an.¹⁴⁴ Sie beträgt 6 dB pro Oktave. Dieser Wert gilt für die Bedingung, ab welcher die „Brennweite“ a gleich der Wellenlänge λ ist, also einem Verhältnis von $a/\lambda > 1$.¹⁴⁵

Der Störabstand zwischen frontal einfallendem Direktschall und umgebendem Diffusschall wird zum einen durch die Reflexion und Konzentration achsparallelen Schalls im „Brennpunkt“ erhöht.

Zum anderen wird der Störabstand durch eine „Abschirmung“ des Mikrofons durch den Reflektor begünstigt. Diese führt zu einer Abschwächung unerwünschten, seitlichen und rückwärtigen Schalls. Die „Schirmwirkung“ des Reflektors hängt von dessen Form sowie der Mikrofonposition ab.¹⁴⁶ Der „Abschirmungseffekt“ verringert sich, wenn die Abmessungen des Reflektors kleiner als die auftreffenden Wellenlängen werden.¹⁴⁷ Anschaulich wird der Einfluss des Reflektors auf umseitig einfallenden Schall auch im Messdiagramm der Richtcharakteristik ([siehe: 7.4.3](#)).

6.3.2 Klangfärbungen und Frequenzeinbrüche

Im „Brennbereich“ des Paraboloiden wird ein Mikrofon angebracht, welches den reflektierten sowie direkt einfallenden Schall in ein Audiosignal wandelt.

Durch Interferenzen zwischen direktem und reflektiertem Schall kommt eine „Verfärbung“ frontalen Nutzschalls zustande. Genauer führen diese Interferenzen an der Position der Membran bzw. im „Brennbereich“ zu Auslöschungen. Resultat ist ein „welliger“ Frequenzgang.¹⁴⁸ Grund sind die unterschiedlich langen Wege und damit verbundenen Laufzeiten, die direkter und reflektierter Schall zurücklegen.

Der zur Zeitverzögerung zugehörige „Abstand“ einer Reflexion vom Direktschall muss klein zur Wellenlänge sein. Andernfalls ist die reflektierte Welle gegenphasig zur direkten und beide kompensieren sich durch Interferenz. Es können Klangfarbenverfälschungen eintreten.¹⁴⁹

¹⁴⁴ Vgl. Olson, S. 320

¹⁴⁵ Vgl. Wahlström, S. 420

¹⁴⁶ Vgl. ebd., S. 424

¹⁴⁷ Vgl. Backman, S. 5

¹⁴⁸ Vgl. ebd., S. 3

¹⁴⁹ Vgl. Cremer, Band 1, S. 69

Dass die Interferenzerscheinung tatsächlich an der Überlagerung der Wellen liegt, zeigt sich bei Verwendung eines Nierenmikrofons. Da hier die „unempfindliche“ Seite des Mikrofons zur Schallquelle zeigt, werden nahezu nur reflektierte Schallstrahlen aufgenommen. Die Auslöschungen und Welligkeiten im Frequenzgang verringern sich. Bei hohen Frequenzen treten je nach Mikrofongröße der Niere, die dann Kugelcharakteristik entwickeln kann, wieder Interferenzerscheinungen auf. Obwohl ein Nierenmikrofon den Kammfiltereffekt fast ausschaltet und ein Richtmikrofon auch den achsfernen Schall abdämpft, werden Druckempfänger verwendet.¹⁵⁰ Ein Gradientenempfänger könnte unvorhersehbare Welligkeiten erzeugen, da er auf Druckunterschiede zwischen Membranvorder- und -rückseite reagiert und die Schalldrücke sich frequenzabhängig über einen ausgedehnten Bereich verteilen.¹⁵¹ Des weiteren würden die erzielbaren Pegel bei tieferen Frequenzen stark geschwächt aufgenommen. Denn durch die fehlende Reflexion und Abschattung des Paraboloiden bei tiefen Frequenzen nimmt das auf den Reflektor zeigende Richtmikrofon nur noch Störschall auf.¹⁵²

Doch nicht nur „auf dem Weg“ zum Mikrofon können Interferenzen entstehen. Wenn die Wellenlängen klein im Verhältnis zur Membran werden, kommt es dadurch „direkt auf der Membran“ zu zusätzlichen Interferenzen (siehe: 5.2.2). Die Druckänderungen erstrecken sich nicht mehr gleichmäßig über die gesamte Membranfläche. Verantwortlich ist der direkte und der reflektierte Schall.^{153,154}

Die Einbrüche im Frequenzgang resultieren jedoch nicht nur aus Interferenzeffekten zwischen direktem und indirektem Schall. Es treten auch Phasenauslöschungen auf, welche durch unterschiedlich lange Wege nur des von der reflektierenden Fläche zum Mikrofon laufenden Schalls verursacht werden. Dies gilt besonders für hohe Frequenzen.¹⁵⁵ Die von unterschiedlichen Teilen der Schüssel reflektierten Schallwellen treffen nicht mehr in Phase im Brennpunkt ein.

Einen Einfluss auf Einbrüche im Frequenzgang und damit verbundene Klangfärbung hat auch der Abstand des Reflektors zur Schallquelle. Befindet sich die Quelle nicht in quasi unendlicher Entfernung ($r > \lambda$, $D < r$), so weisen die Schallwellen einen divergierenden Charakter auf. Bei der Reflexion einer divergierenden Welle

¹⁵⁰ Vgl. Backman, S. 5

¹⁵¹ Vgl. Wahlström, S. 422

¹⁵² Vgl. Backman, S. 5

¹⁵³ Vgl. Wahlström, S. 422

¹⁵⁴ Vgl. Backman, S. 5

¹⁵⁵ Vgl. Wahlström, S. 421

verschiebt sich der „Brennbereich“ vom Scheitelpunkt des Reflektors weg. Die entsprechende Welle wird nicht mehr maximal konzentriert.¹⁵⁶

Befindet sich die Quelle im Nahfeld oder abseits der Mittelachse (Drehachse) des Reflektors, kommt es somit zu einer „Störung“ des „Brennbereichs“. Der „Verstärkungsfaktor“ hoher Frequenzen reduziert sich.¹⁵⁷ Mit verantwortlich ist ein sich verkleinernder „Brennbereich“ bei höheren Frequenzen, welcher dann nicht mehr mit der Mikrofonposition übereinstimmt.

Der Effekt einer „nahen“ Schallquelle hatte auch auf die von uns getätigten, akustischen Messungen sowie die „Fokussierung“ Einfluss ([siehe: 7.2.1](#)).

Die „Färbungen“ im Klangbild treffen auch auf den Diffusschall zu, da sich dieser aus dem Mittelwert des allseitig einfallenden Schalls ergibt. Durch die „akustische Verstärkung“ des Reflektors entsteht jedoch ein größerer Abstand zwischen Nutz- und Störschall. Daher hat der Störschallpegel in seiner spektralen Zusammensetzung also nicht mehr einen solch hohen Einfluss auf den Höreindruck.

Trotz des zu erwartenden, „unnatürlichen“ Klangeindrucks kommt das „Parabilmikrofon“ für unsere Zwecke in Betracht. Die hohe Richtwirkung für frontalen Schall ist das wichtige Kriterium, weshalb die klanglichen „Abweichungen“ von Direkt- und Diffusschall in den Hintergrund treten.

6.3.3 Einsatzgebiete

Das „Parabilmikrofon“ erfreut sich besonders bei der Sportberichterstattung amerikanischer Sender großer Beliebtheit, um die Geräusche vom „Field Of Play“ zu erhalten.

So findet es schon seit längerem vor allem im „American Football“ Verwendung. Die übertragenden Sender setzen es zur Aufnahme der Feldgeräusche ein. Dort werden die Mikrofone manuell von Operateuren bewegt, immerhin 4-6 Personen pro Spiel. Die Verwendung von Reflektormikrofonen bei Baseball ist ebenso verbreitet.¹⁵⁸

¹⁵⁶ Vgl. Wahlström, S. 421

¹⁵⁷ Vgl. Backman, S. 1

¹⁵⁸ Vgl. Owens, S.225



Bild 18. Einsatz eines „Parabolkmikrofons“ beim „American Football“. Der „Operator“ befindet sich an der Seitenlinie.

Auch bei Tierdokumentationen kommt das „Parabolkmikrofon“ zum Einsatz. Oft müssen die Filmemacher die wilden Tiere aus großen Entfernungen aufnehmen und langbrennweitige Objektive verwenden. Daher bietet sich der Einsatz dieses hochrichtenden Mikrofons an.

Bekannt sind „Parabolkmikrofone“ auch von Vogelkundlern, welche sie einsetzen um die Stimmen und „Gesänge“ von Vögeln einzufangen. Da Vogelgezwitscher aus überwiegend hohen Frequenzen besteht, lässt sich dieses durch Reflektoren kleineren Ausmasses schon befriedigend „konzentrieren“.

Durch das begrenzte Frequenzspektrum vieler Tiergeräusche hat die theoretische Verstärkung von ca. 6 dB pro Oktave zudem keinen großen Einfluss auf das Klangbild.¹⁵⁹

6.3.4 Anwendung auf das Projekt

Für das Erreichen des Projektziels ist das „Parabolkmikrofon“ durch die theoretisch erzielbaren Abstände zwischen Stör- und Nutzschaall zunächst am geeignetsten.

Das „Parabolkmikrofon“ erscheint aufgrund seiner hohen „Verstärkungswerte“ als interessante Möglichkeit. Die Messung eines solchen Mikrofontyps im nächsten Kapitel wird nähere Informationen über den Nutzen für unser Projekt geben.

¹⁵⁹ Vgl. Wahlström, S. 422

Nachteilig sind aber ohne Zweifel die Abmessungen des gesamten Systems. Für einen effektiven Einsatz muss der Reflektor eine gewisse Größe vorweisen. Bezieht man, wie in [4.3](#) bereits angesprochen, „visuelle Aspekte“ mit ein, können die derzeit für Richtmikrofone gültigen Standorte an den Seitenlinien des Fußballfeldes wohl kaum beibehalten werden. Daher wäre eine Position außerhalb des Sicht- und Aktionsbereichs am geeignetsten, wodurch sich jedoch der Abstand zur Nutzschaquelle vergrößert.

Ein weiterer Nachteil ist die mechanische Empfindlichkeit des Systems aus Reflektor, Mikrofon und Stellmotor. Trifft beispielsweise der Ball auf den Reflektor, so verstellt sich das gesamte System oder wird beschädigt.

6.4 „Audioscope“ der Firma „Squarehead“

Hier handelt es sich um ein auf dem Markt befindliches Beamforming-System ([siehe: 5.2.4](#)). Es wurde speziell für die Anwendung im Bereich von Sportübertragungen entwickelt.

Das Mikrofonarray ist scheibenförmig gestaltet. Der Durchmesser der Scheibe beträgt ca. 1 m. Innerhalb dieser Fläche finden rund 300 Mikrofonkapseln zur Schallaufnahme Verwendung. Das System besteht aus 2 solcher Scheiben, die bevorzugt in erhöhter Position hinter den beiden Toren aufgebaut werden sollen. Innerhalb des Arrays ist eine Videokamera integriert, die ihre Bildinformationen auf ein optisches Kontrollfeld (Video) überträgt. Hier kann der Benutzer die aufzunehmende Schallquelle markieren, worauf die Signalverarbeitung die einzelnen Mikrofonsignale so bearbeitet, dass die Schallanteile aus der gewählten Richtung aufsummiert werden. Die übrigen Geräusche erfahren eine Bedämpfung.¹⁶⁰ Die Abschwächung von nicht im „Fokus“ liegenden Geräuschen wird mit bis zu -30 dB angegeben.

Das System zeichnet die Audiosignale sämtlicher Mikrofonkapseln auf ein Festplattensystem auf. Aus den so vorhandenen Audioinformationen wird das benötigte Signal errechnet. Da so die Informationen des gesamten Schallfeldes verfügbar sind, können auch noch zu einem späteren Zeitpunkt die gewünschten Schallereignisse „herausgegriffen“ werden.

¹⁶⁰ Vgl. Deutschlandfunk

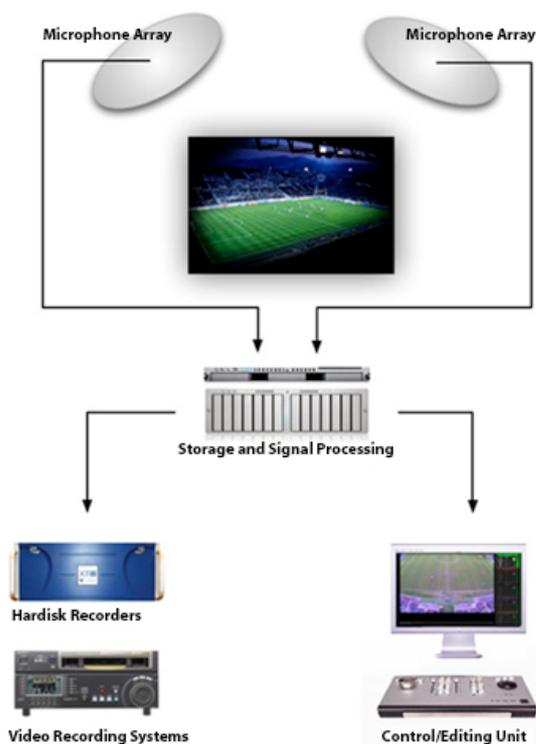


Bild 19. Funktionsweise des „Audioscope“. Die Mikrofonsignale werden dem „Signal Processing“ zugeführt. Die Steuerung erfolgt über eine grafische Oberfläche mit „Live-Video“. Das errechnete Summensignal kann auf ein Recording-System oder zur Programmverbreitung gegeben werden.

Ziel von „Audioscope“ ist das Ersetzen der Vielzahl an aufgestellten Mikrofonen. So sollen nach Vorstellung der Entwickler die Systeme verwendet werden, um den Ton auf bildbezogene Inhalte zu fokussieren. Die getrennte Mikrofonierung von Tribünen und Spielfläche soll überflüssig werden. Das System wurde auf Sprachwiedergabe optimiert.¹⁶¹

Es ist jedoch zu bezweifeln, ob das System von der Klangqualität her eine vollwertige Atmo-Mikrofonierung ersetzen kann. Erfahrene Sound Designer bevorzugen die separate Mikrofonierung der Umgebungsgeräusche. Auf die bloße „Mitnahme“ der Atmo in den eigentlichen „Feldmikrofonen“ sollte verzichtet werden.¹⁶²

Ebenso fraglich ist die optische Auffälligkeit des Systems, welche zu bedeutenden Sichteinschränkungen für die Zuschauer und Fernsehkameras führen kann.

„Audioscope“ wird derzeit vom norwegischen Sender TV2 für Fußballübertragungen eingesetzt.

¹⁶¹ Vgl. Deutschlandfunk

¹⁶² Vgl. Owens

Vorteilhaft bei diesem Ansatz ist der Verzicht auf jegliche mechanisch empfindlichen Teile, wie z.B. einen Stellmotor oder Reflektor ([siehe: 6.3](#)). Die Verfolgung des Schallereignisses geschieht „virtuell“ durch Rechenprozesse („Signal Processing“). Sehr reizvoll ist auch die Möglichkeit, durch die Verwendung einer Festplatte in der Lage zu sein, die gewünschten Töne noch im Nachhinein auswählen zu können. „Audioscope“ kann so neben dem „Live-Einsatz“ im Stadion auch bei der „Post-Production“ z.B. eines Spielberichts Verwendung finden.

7 Mikrofonmessung

Die anschließenden Abschnitte enthalten Informationen zu den durchgeführten Mikrofonmessungen. In erster Linie sollen die Schallwandler auf ihre Richtwirkung hin untersucht werden. Durch Abgleichen der Ergebnisse mit den vorangegangenen Abschätzungen der Schalldruckpegel ([siehe: 4.5](#)) ergeben sich Informationen über die Tauglichkeit der jeweiligen Systeme für den Projekteinsatz.

7.1 Auswahl der Mikrofone

Nach dem im letzten Kapitel dargestellten Technikvergleich kamen zwei Mikrofontypen in die engere Wahl. Es handelte sich um das Audio Technica „AT895“ sowie den Parabolreflektor in Verbindung mit einem Kugelmikrofon. Das „AT895“ wurde freundlicherweise für Testzwecke von Audio Technica zur Verfügung gestellt. Der Parabolreflektor wurde von der Firma „Telinga Microphones“ bezogen. Dieses Unternehmen mit Sitz in Schweden hat sich auf die Produktion von hochrichtenden Mikrofonen spezialisiert.

Der Test bzw. die weitere Vertiefung mit „normalen“ Richtrohrmikrofonen wurde nicht durchgeführt, da die Richtwirkung bzw. die Dämpfung für Schall aus unerwünschten Richtungen zu schwach erschien.

Auf Grundlage umfangreicher Recherche ist davon auszugehen, dass das „AT895“ sowie das „Parabilmikrofon“ die derzeit am stärksten richtenden, erhältlichen Mikrofontypen sind. Arraysysteme sind noch sehr teuer und in ihren Abmessungen unvorteilhaft. Somit steht ein Array unserem Ansatz eines kompakten, leicht in bestehenden Infrastrukturen integrierbaren Systems entgegen. Hinzu kommt die noch geringe Klangqualität dieses Mikrofontyps.

7.2 Zusammenfügen des „Parabilmikrofons“

Der von uns angeschaffte Parabolreflektor besitzt einen Durchmesser von $D = 55,88$ cm (≈ 22 Zoll). Ab einer Frequenz von ca. 615 Hz kommen die Maße des Reflektors also theoretisch in den Bereich der auftreffenden Wellenlänge. Den Reflektor kombinierten wir mit einem „Neumann KM83i“ Kugelmikrofon. Das „Neumann“ hat

einen sehr linearen Frequenzverlauf. Lediglich bei 9 kHz zeigt das Frequenzdiagramm des Herstellers eine Anhebung um 6dB. Es handelt sich um ein „diffusfeldentzerrtes“ Mikrofon.

Als Ergebnis der Fokussierung ([siehe 7.2.1](#)) wurde die Mikrofonmembran in einem Abstand $a = 11,5$ cm vom Scheitel des Paraboloiden entfernt angebracht. Die Tiefe des Reflektors, also der Abstand von Scheitel zu Öffnungsebene, beträgt $l = 20$ cm. Das „Parabilmikrofon“ weist somit ein l/a -Verhältnis von rund 1,74 auf ([siehe: 6.3.1](#)).

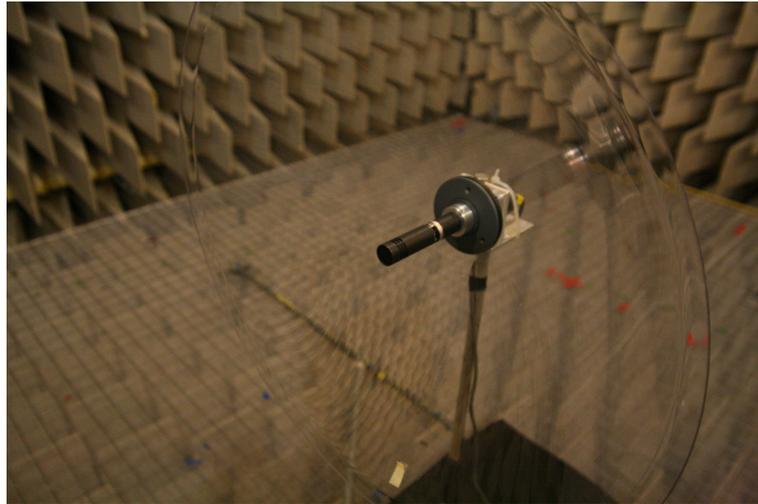


Bild 20. Nahaufnahme des „Parabilmikrofons“.

7.2.1 Optische und akustische Fokussierung

Um den „Brennpunkt“ genau bestimmen zu können, muss die Fokussierung mit einem parallel zur Mittelachse auf die Parabel treffenden Strahl erfolgen. Nur ein solcher Strahl wird zum gemeinsamen Zentrum hin umgelenkt. Da die benötigte, ebene Wellenfront des Schalls erst ab einer Entfernung $r > \lambda$ Gültigkeit besitzt, wurde der Fokus zunächst mittels der optischen Methode gesucht. Durch die kurzen Lichtwellen ist die genannte Bedingung der „Parallelstrahlen“ gegeben.

Hierzu wurde ein Laserstrahl, parallel verschoben zur Rotationsachse des Paraboloiden, auf den Reflektor gerichtet. Da der Reflektor aus einem optisch transparenten Material besteht, musste dieser für die optische Messung mit einer reflektierenden Aluminiumbeschichtung ausgekleidet werden. Da der Paraboloid rotationssymmetrisch gestaltet ist, genügte es, das Aluminium in einem schmalen Bereich anzubringen.

Der Laserstrahl schnitt daraufhin in einem Abstand von 12,5 cm vom Scheitelpunkt der Parabelform entfernt die Rotationsachse. An dieser Position liegt der „Brennpunkt“ der optischen Fokussierung.

Da der Reflektor nicht zur Licht- sondern zur Schallbündelung eingesetzt werden soll, wurde nun eine „akustische Fokussierung“ durchgeführt. Die Fokussierung erfolgte im reflexionsarmen Raum (RaR) des IRT.

Um eine annähernd ebene Wellenfront zu erzeugen, muss die Entfernung r von Lautsprecher zu Mikrofon groß gegenüber den Mikrofonabmessungen (hier: D) sowie der Wellenlänge λ sein. Es gilt:

$$r > \lambda \quad D < r$$

Für die akustische Bestimmung betrug $r = 2,5$ m. Größere Abstände waren aufgrund der Begebenheiten im RaR nicht möglich. Bei einem Durchmesser $D = 55,88$ cm ist die Entfernung r ca. 4,47 mal größer als das „Mikrofon“. Da wir den Lautsprecher als Punktschallquelle betrachten, treffen die Wellennormalen mit ca. 6° Abweichung auf die Randbereiche des Reflektors. Durch die Abweichung im Einfallswinkel verändert sich der „Brennpunkt“ mit zunehmendem Abstand des auftreffenden „Strahls“ von der Rotationsachse. Dies ist ein wesentlicher Grund in der Entstehung eines so genannten „Brennbereichs“ für Schallwellen.

Zunächst kamen reine Sinus-Schwingungen unterschiedlicher Frequenz als Mittel zur „Brennpunktbestimmung“ zum Einsatz. Im Anschluss erfolgte die Beschallung mit „rosa Rauschen“, also einem breitbandigen Geräusch.

Die Testsignale wurden mit dem Gerät „Minirator MR1“ von NTI erzeugt. Es handelt sich hierbei um einen analogen Audiogenerator, der direkt an Verstärker oder Aktivlautsprecher angeschlossen werden kann. Als Lautsprecher kam an dieser Stelle ein „Klein + Hummel O110“ zum Einsatz.

Die Ausrichtung des Lautsprechers erfolgte per Laserstrahl auf das im rotationssymmetrischen Zentrum des Parabolreflektors angebrachte Mikrofon. Mittels eines hochwertigen analogen Messgeräts konnte die vom Mikrofon abgegebene Spannung angezeigt werden.

Der Gedanke war, das Mikrofon bei den jeweiligen Testsignalen auf der Mittelachse des Reflektors zu verschieben. Wenn der Ausschlag des Messgeräts maximal ist, so befindet sich das Mikrofon im „akustischen Brennpunkt“.

Ausgehend vom zuvor gefundenen, optischen Brennpunkt (12,5 cm) wurde das „Neumann“ nun auf der Suche nach „einem Maximum“ bewegt.

Die ermittelten Ergebnisse ließen jedoch keine eindeutige Aussage über einen Punkt, in dem sich sämtliche Wellen konzentrieren, zu. Vielmehr scheint es sich, für das gesamte Frequenzspektrum gesehen, um einen „Brennbereich“ zu handeln.

So entsteht bei der Beschallung mit reinen Sinus-Schwingungen ein mit der Frequenz variierender „Fokus“. Das Mikrofon muss in seiner Entfernung zum Reflektor (a) angepasst werden, um wieder im Bereich größter Verstärkung positioniert zu sein.

Beispielsweise entfaltet sich bei einem Sinus mit 2,5 kHz ein Bereich konstanter Mikrofonspannung von 6,8 cm bis 11 cm. Bei einem 5 kHz-Sinus verschiebt sich die Zone maximalen Ausschlags zu Werten von 9,7 cm bis 13,2 cm. Die „Brennbereiche“ verkleinern sich in diesem Fall mit zunehmender Frequenz. So wurde bei 10 kHz ein Maximum in 11,1 cm Entfernung vom Scheitel gemessen. Ein „ausgedehnter Maximalbereich“ konnte hier kaum festgestellt werden. Bei 16 kHz wanderte der, nun sehr schmale „Brennbereich“ zu 12,4 cm.

Die Frequenz von 1 kHz wurde beim Verschieben des Mikrofons zum Reflektor hin immer stärker betont. Allerdings passierte dies nicht in einem konstanten Zusammenhang. So entstanden mehrere Maxima in unterschiedlichen Abständen.

Handelt es sich beim Testsignal um „rosa Rauschen“, so führt die beschriebene Frequenzabhängigkeit zu Klangfarbenänderungen. Beim Bewegen des Mikrofons wird also nicht das gesamte Rauschsignal geschwächt oder verstärkt. Es kommt zur Betonung einzelner Frequenzbereiche.

Die kurze Strecke (ca. 2,5 m) zwischen Lautsprecher und Reflektormikrofon könnte die bedeutende Ursache für das nur schwer zu erfassende und kaum vorhersehbare Verhalten des Mikrofons im Schallfeld sein.

Durch die Eigenschaft der unterschiedlichen Fokussierung bestimmter Frequenzbereiche lässt sich das „Parablmikrofon“ auf das Spektrum der Feldgeräusche optimieren. Nicht „erwünschte“ Frequenzbereiche kann man so reduzieren. Dies sollte bei der Wahl des Membranabstandes zum Reflektor bedacht werden. Hierzu ist es grundlegend, die Schallquelle in ähnlicher Entfernung, wie sie bei späterem Einsatz auftritt, zu positionieren. Denn das „Parablmikrofon“ reagiert sehr empfindlich auf Abstandsänderungen zwischen Schallquelle und Reflektor. Bei den

vorgefundenen Entfernungen in einem Stadion sollten wir von quasi unendlicher Entfernung ausgehen können.

Zudem sollte die Mikrofonposition einen Kompromiss zwischen Abschattung diffusen Schalls durch den Reflektor und optimaler Positionierung des Mikrofons im „Brennbereich“ zur guten Direktschallverstärkung bilden. Da es sich um einen „Brennbereich“ handelt, ist eine akkurate Position weniger ausschlaggebend. Sie sollte zugunsten einer besseren „Abschirmung“ des Mikrofons näher zum Scheitel verlegt werden.

Die Einbeziehung dieser Argumente ergab nach „akustischer Fokussierung“ eine Entfernung der Membran zum Scheitel der Parabel von $a = 11,5$ cm.

7.2.2 Modifikationen

Um die geplante Nachführung zu Beginn händisch erproben zu können, wurde vom IRT eine spezielle Halterung für die Befestigung des Paraboloiden auf einem Videostativ gefertigt.

Durch die Verwendung eines hochwertigen Videostativs lassen sich problematische Schwenk- und Griffgeräusche, die sich durch Körperschall auch auf das Mikrofon ausbreiten, minimieren. Auch die Halterung des Mikrofons im Reflektor wurde modifiziert und gegen das mitgelieferte Teil ausgetauscht. Dies geschah, da eine genaue „Fokussierung“ des Mikrofons ansonsten nicht möglich gewesen wäre.

7.3 Messaufbauten und Messsysteme

Nachstehend gibt der Verfasser einen Überblick über die Testbedingungen, unter welchen die beiden Mikrofontypen geprüft wurden.

Das „AT895“ sowie das „Parabilmikrofon“ wurden im reflexionsarmen Raum (RaR) des IRT auf ihre Richtcharakteristik und damit Frequenzübertragungsfunktion abhängig von der Einfallrichtung hin untersucht.

7.3.1 Der reflexionsarme Raum

Reflexionsarme Räume (RaR) sollen die Verhältnisse bei freier Schallausbreitung nachbilden. Wie im Freifeld versucht man, eine Umgebung mit vernachlässigbarer Reflexion zu erzeugen. Sämtliche Begrenzungsflächen des Raumes bestehen aus Pyramiden und Keilen, die aus porösem Material gefertigt sind. Dieses Material hat eine stark schallabsorbierende Wirkung. Damit selbst der „Fußboden“ aus einer Keilfläche bestehen kann, wird ein begehbare Gitter über die Keile gespannt. Das Gitter ist für die Schallwellen „unsichtbar“.

Einer in das poröse Material eingedrungenen Schallwelle wird längs einer gewissen Strecke sämtliche Energie entzogen. Allerdings wird auch ein Teil an den Grenzflächen reflektiert. Durch die Keil- und Pyramidenfläche kann diese Reflexion gemindert werden. Auf diese Weise erfährt die einfallende Welle einen allmählichen Übergang aus der freien Luft in das poröse Material.¹⁶³ Außerdem ist durch die Verwendung von Keilen die Reflektorfläche nicht parallel zur Grundfläche des Raumes.¹⁶⁴ Über schmale Schlitz zwischen den Keilen kann ein dahinter liegender Luftraum angekoppelt werden, der als Resonanzabsorber wirkt und die Absorption tieffrequenter Schallanteile verbessert.¹⁶⁵

7.3.2 Abstand und Schallausbreitung

Zur Messung wird das zu untersuchende Mikrofon im RaR auf ein, durch einen Drehmotor verstellbares, Stativ befestigt. In einem Abstand von ca. 1,6 Meter befindet sich ein Lautsprecher. Das Mikrofon ist zunächst direkt auf das „akustische Zentrum“ des Lautsprechers ausgerichtet. Durch die geringe Größe des

¹⁶³ Vgl. Meyer, S. 75

¹⁶⁴ Vgl. Cremer, S. 27

¹⁶⁵ Vgl. Kuttruff, S. 273

Messlautsprechers kann von einer überwiegend kugelförmigen Schallabstrahlung ausgegangen werden.

Im Normalfall ist die Mikrofonmembran klein gegenüber dem Abstand des Mikrofons zum Lautsprecher. Dann kann für die Betrachtung von einer annähernd ebenen Wellenfront ausgegangen werden. Im Falle des „AT895“ wird dies erfüllt. Für das „Parabilmikrofon“ mit $D = 55,88$ cm Durchmesser ergeben sich für die Randbereiche Einfallswinkel von ca. 8° als maximale Abweichung vom senkrechten Schalleinfall (0°). Dies ist keine ideale ebene Welle. Die Problematik der nahen Schallquelle wurde bereits in [6.3.1](#) angedeutet.

Der Lautsprecher, der Motor des Drehtellers sowie der Signalausgang des darauf angebrachten Mikrofons sind mit dem Messcomputer verbunden. Dieser übernimmt die weitere Messung nun automatisiert.

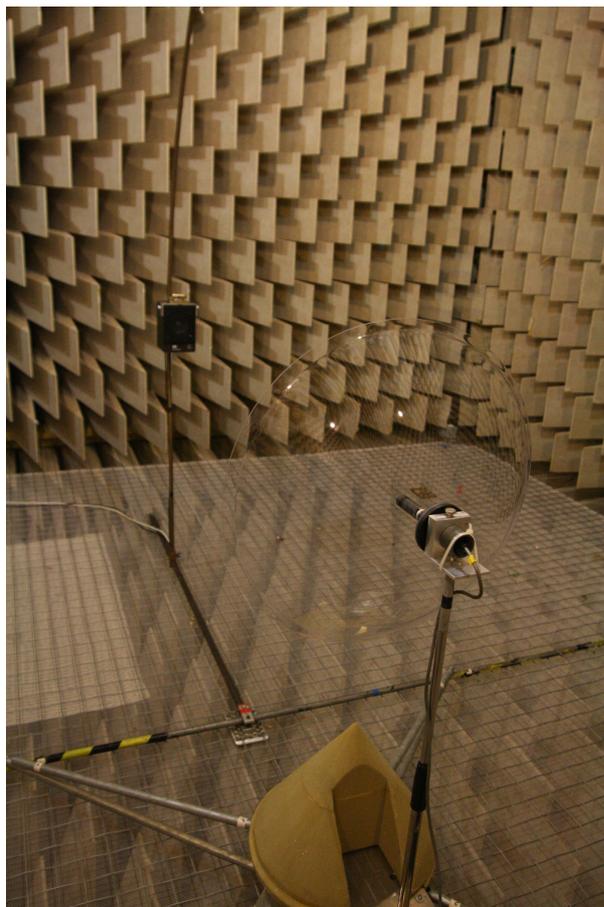


Bild 21. Messaufbau zur Bestimmung der Richtcharakteristik im RaR des IRT. Der Messlautsprecher befindet sich im Abstand von ca. 1,6 m. Das Bild zeigt die Messung des 0° -Frequenzgangs des „Parabilmikrofons“.

7.3.3 Durchführung der Messungen

Nach folgendem Ablauf passierte die Ermittlung der richtungsabhängigen Übertragungsfunktionen von „AT895“ und „Parabilmikrofon“ im RaR:

Zunächst wird der Drehteller auf den gewünschten Winkel eingestellt, von dem die Übertragungsfunktion abhängig von der Einfallrichtung gemessen werden soll. Im Ruhezustand wird dann das Messsignal auf den Lautsprecher gegeben.

Hierbei handelt es sich um ein so genanntes MLS-Signal.¹⁶⁶ Die spektrale Zusammensetzung dieses Signals ähnelt dem weißen Rauschen. Im Gegensatz zu normalem Rauschen ist es aber zu jedem Zeitpunkt definiert, es handelt sich um eine „pseudo-zufällige“ Signalfolge. Nach einer gewissen Zeit wiederholt sich das MLS-Signal periodisch. „MLS“ liefert das Verhalten des Systems im Zeit- und im Frequenzbereich.¹⁶⁷

Nun erfolgt die eigentliche Messung. Die durch die Beschallung mit dem Messsignal entstehenden Messwerte werden in einer Datei gespeichert. Anschließend wird der Drehtisch auf die nächste Winkelposition gedreht. I.d.R. erfolgt die Messung in Schritten von 5°. Durch die Drehung kann im entstehenden Diagramm aufgezeigt werden, wie sich das Mikrofon für direkten Schalleinfall aus seitlichen und hinteren Richtungen verhält.

Am Ende der Messung wird der Lautsprecherfrequenzgang mit einem Messmikrofon gemessen. Das Messmikrofon verfügt über einen sehr linearen Frequenzverlauf über das gesamte Spektrum. Mit dem erfassten Lautsprecher-Frequenzgang wird die Mikrofonmessung dann korrigiert.

Da der Messcomputer weiß, welche Form das gesendete MLS-Signal besitzt, kann er es mit dem durch das Mikrofon zurückgelieferten vergleichen. Es kann so festgestellt werden, welche Veränderungen das Testsignal durch das Mikrofonsystem erfahren hat.

¹⁶⁶ „Maximum Length Sequence“ (Maximallängensequenz)

¹⁶⁷ Vgl. Audiomatica

7.4 Messergebnisse und deren Interpretation

Es folgt die Auswertung zu den Messungen von „AT895“ und „Parabilmikrofon“. Neben der Richtwirkung spielte auch das Rauschverhalten der Mikrofone eine Rolle. Die Interpretation der Ergebnisse geschieht vor dem Hintergrund der für das Projekt wichtigen Parameter.

7.4.1 Richtwirkung „AT895“

Wie dem nachfolgenden Polarkoordinatendiagramm zu entnehmen ist, besitzt das „AT895“ in der Einstellung „hohe Richtwirkung“ eine ausgeprägte Richtcharakteristik. Diese ist höher als bei Mikrofonen mit „gewöhnlicher“ Interferenzrohrtechnik ([siehe: 6.1](#)). Allerdings ist sie auch kleiner, als vollmundig in den Datenblättern des Herstellers angekündigt. Die Datenblätter waren ausschlaggebend für unsere Vorauswahl.

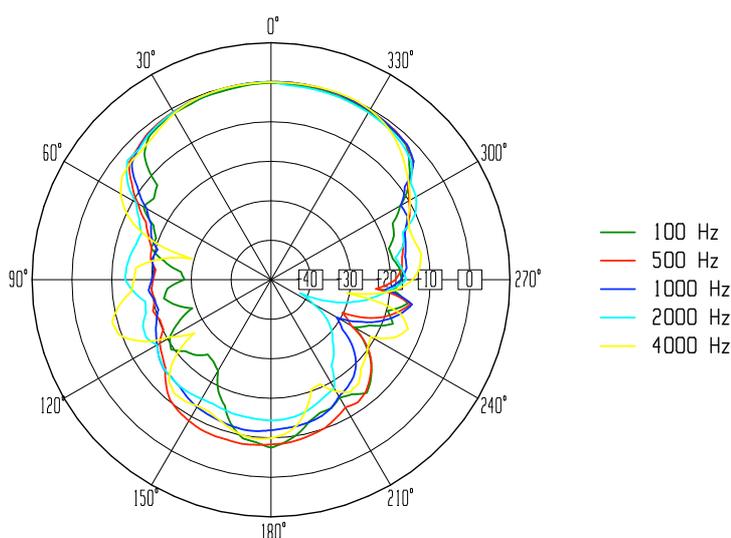


Bild 22. Richtcharakteristik „AT895“ schmalbandig (bei 0° auf 0dB normiert).

Speziell die schwächeren Werte der rückwärtigen Schalldämpfung von maximal -15dB bei 2 kHz könnten bei einem Einsatz des Mikrofons für unsere Zwecke nachteilig ausfallen. Denkt man an den diffusen Publikumsschall, so ist eine hohe Dämpfung des Mikrofons für von hinten einfallenden Schall sehr vorteilhaft.

Beeindruckend im Vergleich zum stärker richtenden „Parabilmikrofon“ ist die geringe Baugröße des „AT895“ im Verhältnis zur Richtwirkung. Dies ermöglicht einen universellen Einsatz des Mikrofons und bietet mehr Freiräume für den Sound Designer bei der Wahl seiner Mikrofonstandorte.

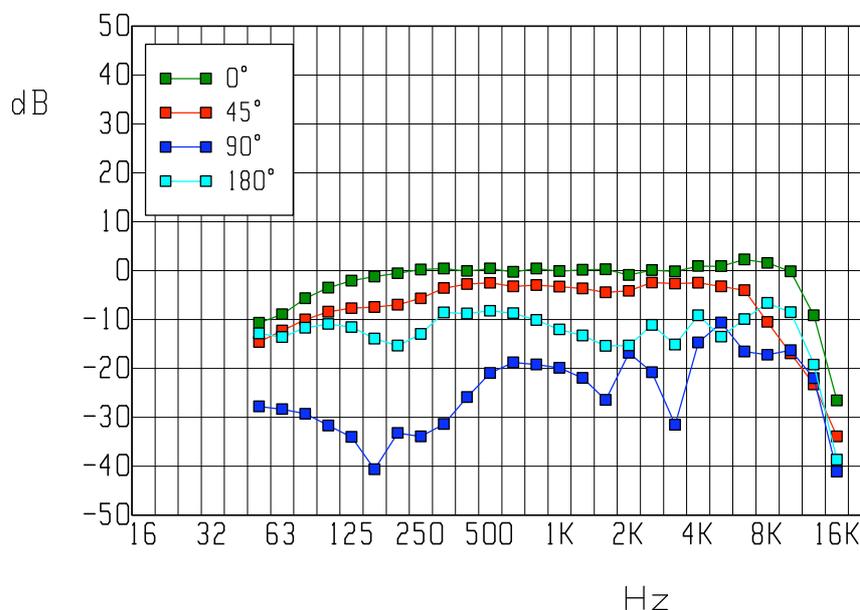


Bild 23. Frequenzgänge „AT895“ in Terzen. Zu sehen sind auch die Übertragungsfunktionen für seitlich einfallenden Direktschall.

Bei den auch im Publikumsschall stark vertretenen Frequenzen zwischen 250 Hz bis 2 kHz bietet das Mikrofon eine Dämpfung von ca. -10 dB bei 60° Abweichung von der 0°-Achse. Der relativ parallel zum 0°-Frequenzgang laufende 45°-Frequenzgang garantiert geringe Klangfärbungen auch bei nicht exakter „Verfolgung“ der Schallquelle. Wie Polarkoordinatendiagramm und Terzdarstellung zeigen, werden von 90° / 270° einfallende Schalle am effektivsten bedämpft. Bis zu einer Frequenz von gut 500 Hz ist hier eine Dämpfung von durchschnittlich -30 dB wirksam. Oberhalb 500 Hz liegt die Unterdrückung des seitlichen Schalls aus 90°/270° meist bei ca. 20 dB, allerdings mit schmalbandigen Maximalwerten in den Bändern von 1,6 kHz sowie 3,3 kHz.

Die großen Unterschiede in der Abschwächung seitlichen Schalls führen in der Summe zu einer „Färbung“ des als diffus angenommenen Störschalls.

Für eine Schalleinfallrichtung von 0° zeigt das „AT895“ einen relativ linearen Frequenzverlauf. Der Anstieg um bis zu ca. 5 dB bei 7 kHz verleiht dem aufgenommenen Material jedoch eine gewisse Präsenz und Betonung. Durch die

Bedämpfung der Frequenzen unterhalb 200 Hz um bis zu 10 dB sollen tieffrequente Störanteile frühzeitig aus dem Signal gefiltert werden.

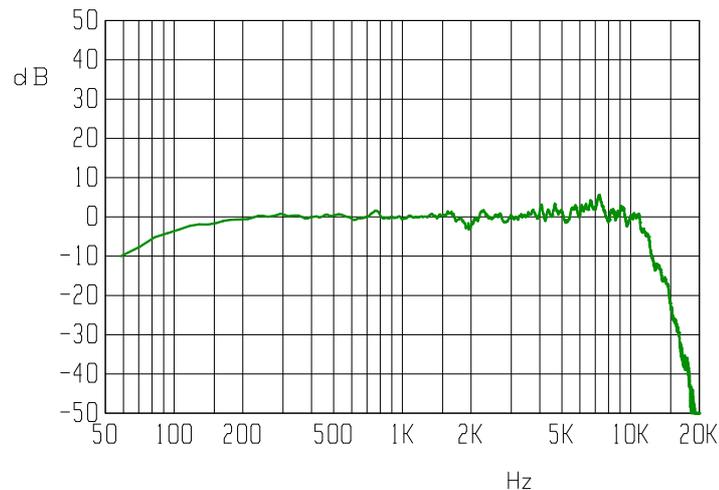


Bild 24. Frequenzgang „AT895“, 0° schmalbandig.

7.4.2 Rauschverhalten „AT895“

Aufgrund unzulänglicher Informationen im Datenblatt wurde das Modell von Audio Technica auch auf sein „Rauschverhalten“ hin geprüft. Dies geschah in einer so genannten „Rauschbombe“. Es handelt sich dabei um ein für Außengeräusche und elektromagnetische Wellen unempfindliches Bleirohr, in welchem das Mikrofon eingeschlossen wird. Somit wird die vom nicht beschallten Mikrofon abgegebene Spannung gemessen.¹⁶⁸ Die Ausgangsspannung des Mikrofons, wenn ihm kein Schall zugeführt wird, bezeichnet man als Störspannung.¹⁶⁹ Die Messung erfolgte mit dem Messgerät „System One“ der Firma Audioprecision.

Um das „Rauschverhalten“ zu bestimmen, wird der so genannte „äquivalente Schalldruckpegel des Eigenrauschens“ ermittelt. Gleichbedeutend ist der Begriff des „Ersatzgeräuschpegels“ sowie die Bezeichnung „Geräuschpegelabstand“.

Die Skala der Störpegelmessung hat ihren Bezugspunkt bei 94 dB (= 1 Pascal). Der „äquivalente Schalldruckpegel“ ist somit die Differenz zwischen dem Bezugspegel von 94 dB und dem vom Mikrofon abgegebenen Störpegel. Bei einem niedrigeren Schalldruck als durch diese Zahl angegeben, ist die bei diesem Druck abgegebene

¹⁶⁸ Vgl. Zollner, S. 197

¹⁶⁹ Vgl. Boye, S. 58

Spannung kleiner als das Rauschen selbst. Das Signal geht im Eigenrauschen des Mikrofons unter.¹⁷⁰

Der Geräuschpegelabstand des „AT895“ betrug 39 dB nach CCIR 468-3 (DIN 45405) bzw. 28 dB(A) (IEC 651). Dies ist ein sehr schlechtes Eigenrauschverhalten und nach Auskunft des „Sachgebiets Akustik“ des IRT deutlich zu hoch.



Bild 25. Ersatzgeräuschpegel bewertet nach CCIR 468-3 (äquivalenter Schalldruckpegel des Eigenrauschens: $94 \text{ dB} - 55 \text{ dB} = 39 \text{ dB}$ (CCIR, QPK))

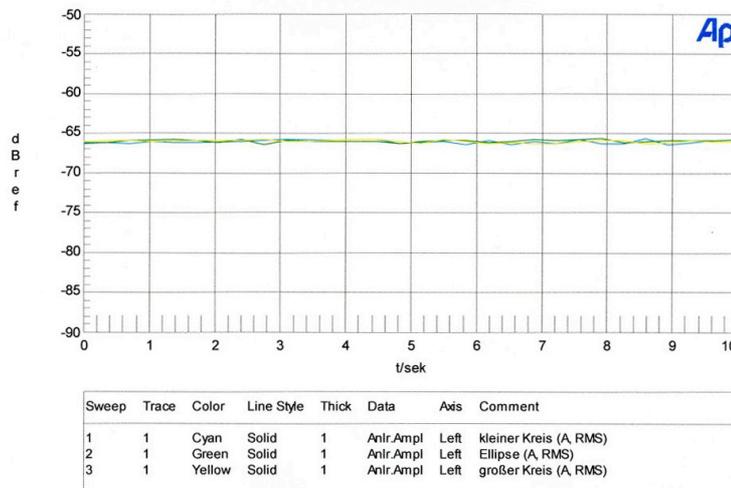


Bild 26. Ersatzgeräuschpegel A-bewertet nach IEC651 (äquivalenter Schalldruckpegel des Eigenrauschens: $94 \text{ dB} - 66 \text{ dB} = 28 \text{ dB}$ (A, RMS))

Der Vertriebsleiter von Audio Technica bestätigte dem Autor das schlechte Rauschverhalten telefonisch. Grund sei die aufwendige Signalverarbeitung der von den verschiedenen Kapseln abgegebenen Signale (siehe: 6.2.1). Zur Zeit der Markteinführung seien keine hochwertigeren DSPs zur Verfügung gestanden. Audio

¹⁷⁰ Vgl. Boye, S. 59

Technica gab bekannt, momentan einen Nachfolger des „AT895“ zu entwickeln. Dieser soll in der Kategorie „Rauschen“ wesentlich bessere Werte erzielen.

7.4.3 Richtwirkung „Parabilmikrofon“

Die Messung im reflexionsarmen Raum ergab eine sehr ausgeprägte, starke Richtwirkung. Diese ist Ergebnis der Reflexion des Schalls am Reflektor sowie des „Abschattungseffekts“, welchen der Paraboloid auf das Mikrofon ausübt. Die Abschattung führt zur Bedämpfung seitlichen und rückwärtigen Schalls.

Die im Terzdiagramm über 0 dB liegenden Werte sind hauptsächlich durch Reflexion begründet. Die Punkte unterhalb der 0-dB-Marke resultieren aus „Abschattungseffekten“ für seitlichen und rückwärtigen Schall durch Reflektor und Mikrofonabmessungen.

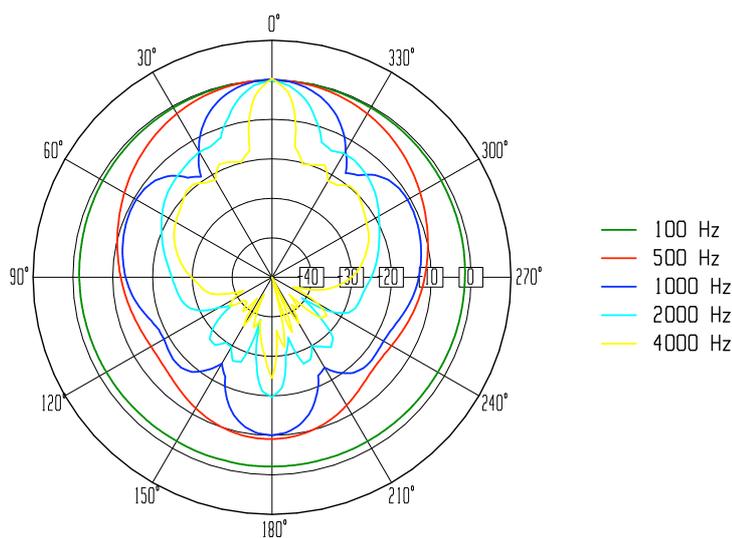


Bild 27. Richtcharakteristik „Parabilmikrofon“ schmalbandig (bei 0° auf 0dB normiert).

Der Beginn der Bündelungswirkung deckt sich ungefähr mit der Theorie. Nach einem ersten Maximum bei ca. 400 Hz „verstärkt“ der Reflektor ab ca. 830 Hz frontal eintreffenden Schall deutlich, wie dem Terzdiagramm entnehmbar ist. Hier erreicht auch die Abschattung bereits Werte von -10 dB bei 90°. Dies ist gleichzeitig die Maximaldämpfung. Mit Erhöhen der Frequenz bleibt die seitliche Dämpfung relativ konstant. Für 45° und 180° nimmt sie wieder ab. Die wesentliche Steigerung der „Effektivität“ des „Parabilmikrofons“ für hohe Frequenzen begründet sich somit im Reflexionsverhalten des Paraboloiden.

Unter 250 Hz verhält sich das System annähernd wie ein „reines“ Kugelmikrofon. Tiefe Frequenzen erzeugen keine Rückwürfe am Reflektor, da ihre Wellenlängen den Durchmesser des Paraboloiden übersteigen. Es kommt zur Beugung. Somit verringert sich ebenfalls die Abschattung des Mikrofons durch den Reflektor für rückwärtigen Schall. Das „Parabolkmikrofon“ ist dann allseitig nahezu gleich empfindlich.

Die Differenz in den richtungsabhängigen Übertragungseigenschaften des Direktschalls steigt bei $90^\circ / 270^\circ$ auf bis zu 33 dB im Bereich zwischen ca. 6 kHz bis 10 kHz.

Die Dämpfung rückwärtigen Schalls steigt mit der Frequenz. In der Kombination aus Verstärkung und Abschattung ergeben sich bis zu 25 dB bei 8 kHz.

Die seitliche Schalldämpfung ist in hohem Maße von der Frequenz abhängig. So beträgt sie bei 60° und 1 kHz ca. 10 dB, während sie bei 2 kHz bereits auf knapp 20 dB ansteigt.

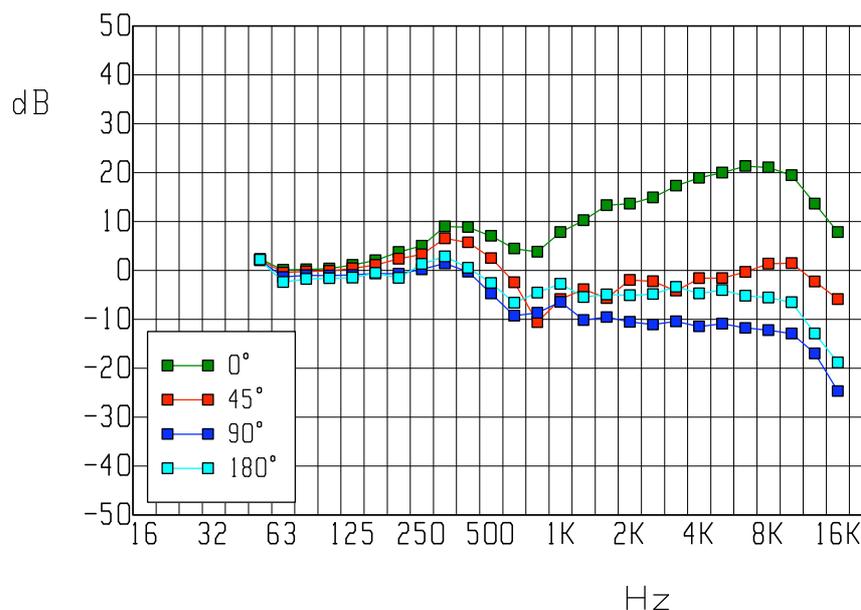


Bild 28. Frequenzgang „Parabolkmikrofon“ in Terzen. Verschiedene Einfallsrichtungen des Direktschalls.

Die Übertragungsfunktion der Testfrequenzen für 0° ist sehr unregelmäßig. Resultat ist ein „welliger“ Frequenzgang. Mögliche Gründe für dieses Verhalten wurden in [6.3.2](#) aufgeführt.

Die starke Betonung der Höhen deckt sich mit den Beschreibungen aus [Kapitel 6.3.1](#). Dies lässt zunächst auf einen eher „dünnen“, jedoch sehr präsenten Klangeindruck schließen. Näheres hierzu findet der interessierte Leser in [Kapitel 8.2](#).

Obwohl die Richtwirkung unterhalb 1 kHz nachlässt, hat der Reflektor noch Auswirkungen auf den 0°-Frequenzgang. So bildet sich nicht der lineare Frequenzverlauf des „KM83i“ heraus. Auffällig ist beispielsweise die bereits erwähnte, starke Überhöhung von 10 dB bei ca. 400 Hz. Der steile Anstieg ab ca. 830 Hz wurde ebenfalls angesprochen. Im Bereich um 2 kHz ist eine schmale Zone relativ gleichbleibender Verstärkung ersichtlich.

Betrachten wir nur die „Verstärkung“ durch Bündelung, so wird ein Spitzenwert von ca. 23,5 dB bei 6 kHz erreicht.

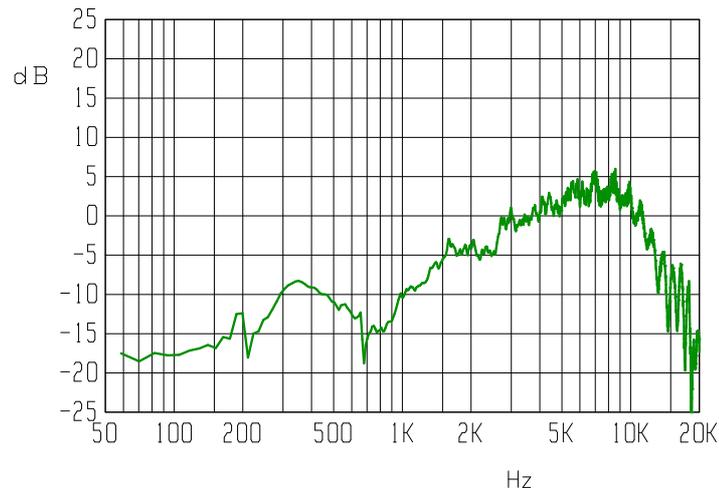


Bild 29. Frequenzgang „Parabolmikrofon“ 0°, schmalbandig.

Die aufgeführten Werte nehmen nur Bezug auf die Übertragung der frontal einfallenden Schalle. Soll eine Aussage über die für das Mikrofon notwendigen Nutzschallpegel getroffen werden, so muss ebenso die durch eine Abschirmung des Reflektors hinzukommende Differenz mit in die Betrachtung einfließen. Hierdurch werden die letztlich interessierenden Werte des Bündelungsmaßes erzielt ([siehe: 7.4.5](#)).

Vergleichen wir das Messergebnis mit der Theorie, so sollte ab ca. 3 kHz (2956 Hz bei $a/\lambda \geq 1$) eine Verstärkung um ca. 6 dB pro Oktave gegeben sein. Dies trifft in unserem Fall nicht zu. Zwar ist das Signal bei einer Frequenzverdopplung auf 6 kHz knapp 5 dB stärker, allerdings erfolgt dann keine weitere Verstärkung. Es entstehen nur einzelne Spitzenwerte, die jedoch keinen theoretisch beschreibbaren Zusammenhang bilden.

An dieser Stelle soll zu einer weiteren Probe der Ergebnisse die Formel¹⁷¹ für den theoretischen Verstärkungsfaktor F_p auf unser „Parabilmikrofon“ angewendet werden ([siehe: 6.3.1](#)).

Nach Berechnung ergibt sich für 1 kHz ein Verstärkungsfaktor von $F_p = 4,47$. Dies bedeutet eine Verstärkung um 13 dB. Die reale Verstärkung beträgt jedoch nur ca. 7,5 dB. Für 2 kHz sollte die theoretische Verstärkung bei 18,8 dB liegen. Bei unserer Messung lag sie bei ca. 12 dB.

Grund für die geringere Verstärkung ist sehr wahrscheinlich die nicht „unendlich“ entfernte Schallquelle.

7.4.4 Rauschverhalten „Parabilmikrofon“

Das Rauschverhalten des im Reflektor verwendeten „KM83i“-Mikrofons beträgt laut Datenblatt 27 dB nach CCIR (DIN 45405). Es liegt somit 12 dB unter der CCIR-Bewertung des „AT895“. Auf eine Bestätigung dieses Wertes in der „Rauschbombe“ wurde aus Zeitgründen verzichtet. Zudem ist der gute Rauschabstand durch vielfache Anwendung dieses Mikrofontyps bei Ton- und Musikproduktionen bestätigt. Die zusätzliche Verwendung eines Reflektors hat auf den Geräuschpegelabstand keine Auswirkung.

7.4.5 Vergleich der Bündelungsmaße

Eine bedeutende Angabe über die Tauglichkeit der Mikrofone für das Projekt ist das jeweilige Bündelungsmaß.

Es ergibt sich aus den Messungen im RaR. Die durch die Mikrofondrehung aus allen Richtungen auf das Mikrofon treffenden Schallstrahlen können in ihrer Gesamtheit als diffuses Schallfeld angesehen werden. Die Bildung des Mittelwertes aller Übertragungsfunktionen des Direktschalls ergibt somit die Übertragungsfunktion für den Diffusschall.

Das Bündelungsmaß des „AT895“ bewegt sich über den gesamten Frequenzbereich konstant um ca. 7 dB. Lediglich in der Zone zwischen 100 Hz bis 250 Hz und in schmalen Bereichen knapp unterhalb 2 kHz und 8 kHz steigt es auf 8 dB.

¹⁷¹ Vgl. Wahlström, S. 427

Das „Parabolkmikrofon“ zeigt in Sachen Bündelungsmaß einen Anstieg mit zunehmender Frequenz. Dieser Effekt ist auf den Reflektor zurückzuführen, der für die „kurzen“ Schallwellen eine Reflexionsfläche sowie ein Hindernis darstellt. Ab ungefähr 500 Hz übersteigt das „Parabolkmikrofon“ die Werte des „AT895“. Somit kann das „Parabolkmikrofon“ im auf den Störschall bezogenen, „wichtigen“ Frequenzbereich zwischen 250 Hz bis 2 kHz ([siehe: 4.1](#)) eine bessere Bedämpfung der diffusen Schalle erzielen. Das Bündelungsmaß erreicht einen konstanten Maximalbereich zwischen 3,5 kHz bis ca. 10 kHz. Es beträgt hier knapp 16 dB. Da auch die Feldgeräusche in diesem Frequenzbereich durchaus nennenswerte Anteile besitzen ([siehe: 4.2.2](#)), sollte dem „Parabolkmikrofon“ im weiteren Projektverlauf Beachtung geschenkt werden.

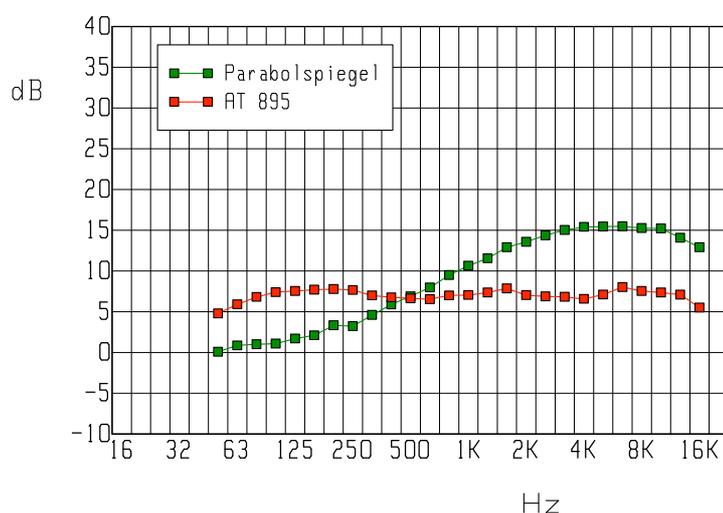


Bild 30. Vergleich der Bündelungsmaße von „AT895“ und „Parabolkmikrofon“. Das in der Grafik als Parabolspiegel bezeichnete Reflektormikrofon bedämpft Diffussschall höherer Frequenzen um bis zu knapp 10 dB stärker (bei 4 kHz).

7.4.6 Eignung für das Projekt

Aufgrund der gemessenen Richteigenschaften ist das „AT895“ grundsätzlich für den Einsatz in geräuscherfüllter Umgebung geeignet. Der vergleichsweise „weite“ Öffnungswinkel des Mikrofons erleichtert die Nachführung. Sehr gut ist die seitliche Dämpfung. Leider verringert sich diese bei rückwärtigem Schalleinfall deutlich.

Vorteilhaft ist auch die relativ lineare Übertragung des Frequenzspektrums. Im Besonderen die Bedämpfung seitlichen, tieffrequenten Störschalls kann Vorteile bei der Aufnahme der tieferen Anteile des Nutzsignals bieten. Diese würden sich besser von der Umgebung abheben.

Wie in [7.4.2](#) beschrieben, ist das Mikrofon vor allen Dingen wegen seines hohen Eigenrauschens für eine weitere Verwendung im Projekt ungeeignet.

Im Gegensatz zum „AT895“ ist das Verhalten des „Parabolkugelmikrofons“ viel stärker von der Frequenz abhängig. So werden seitlich einfallende Schallwellen um ein Vielfaches bedämpft, allerdings erst ab ca. 1 kHz. Unterhalb dieser Frequenz fällt die Richtwirkung stark ab. Das „Parabolkugelmikrofon“ wird zum Kugelmikrofon.

Die guten Differenzwerte zwischen frontalem und seitlichem Schall ergeben sich aus der Kombination von Reflexion und Abschirmung durch den Reflektor.

So verfälscht das Parabolkugelmikrofon das Klangeignis stark in seinem Charakter. Im Tiefenband ist eine Unterscheidung zwischen Nutz- und Störschall kaum möglich.

Es gilt festzuhalten: Unter günstigen Bedingungen (= geringer Störpegel) kann der Standort „Seitenlinie“ in Kombination mit einem „Parabolkugelmikrofon“ durchaus zu einer erfolgreichen Aufnahme der Feldgeräusche genutzt werden. Eine präzise Nachführung des Mikrofons durch den „Drehteller“ ([siehe: 10](#)) ist dabei sehr wichtig. Visuelle und praktische Nachteile dieser „akustisch idealen“ Lösung wurden angedeutet.

Wie auch die beispielhafte Verwendung des „Parabolkugelmikrofons“ in der NFL zeigt, kann der Einsatz dieses Mikrofontyps funktionieren. Allerdings muss der Entwicklung einer Frequenzgangkompensation ([siehe: 9.2](#)) Beachtung geschenkt werden, um ein hochwertiges Feldgeräusch zu erhalten.

8 Praxistest des „Parabilmikrofons“

Wegen des schlechten Rauschverhaltens und der schwächeren Richteigenschaften entschieden wir uns, das „AT895“ in den weiteren Betrachtungen nicht zu berücksichtigen. Das „Parabilmikrofon“ erschien uns am geeignetsten. Daher beziehen sich die nachfolgenden Betrachtungen speziell auf das „Parabilmikrofon“ aus [7.2](#).

Wie sich bei den Messungen herausstellte, besitzt das „Parabilmikrofon“ eine zu hohen Frequenzen hin ansteigende Empfindlichkeit. Aus der Erfahrung lässt sich mittels dieser Frequenzkurve ableiten, wie das aufzunehmende Geräusch nach Wandlung durch das Mikrofon „klingen“ wird.

Um jedoch einen Eindruck von dem tatsächlichen Einfluss des Reflektors auf den Klang sowie die Effektivität der Richtwirkung zu erhalten, wurden einige praktische Tests durchgeführt.

8.1 Bedingungen des Tests

Wie bereits bei der Ermittlung des Schalldrucks und Frequenzverlaufs von Spielgeräuschen ([siehe: 4.2](#)), war die Testumgebung wieder der Rasenplatz auf dem Gelände des Bayerischen Rundfunks.

Der Abstand zu den Spielaktionen betrug ca. 15 Meter. Aufgenommen wurde mit dem „Parabilmikrofon“ und zu Vergleichszwecken parallel mit einem Wandler gleichen Typs („Neumann KM83i“) ohne Reflektor. Die beiden Mikrofonkapseln wurden in identischem Abstand vom Schallereignis und in gleicher Höhe vom Boden (ca. 120 cm) angebracht. Die Ausrichtung erfolgte auf den ruhenden Ball. Der wesentliche „Unterschied“ zwischen den Mikrofonsignalen war somit der Reflektor. Aufgezeichnet wurde erneut auf dem „Edirol R-4“-Field Recorder.

Selbstverständlich sind die akustischen Bedingungen in einem großen Stadion aufgrund des hohen Störschallpegels sehr viel „extremer“. Ziel dieses Tests sollte jedoch sein, eine Vorstellung der Klangästhetik und „Direktheit“ des Reflektormikrofons in Bezug auf die „Nutzsignale“ zu erhalten.

8.2 Klangeindruck

Die Ergebnisse bestätigten die „klangmäßigen“ Erwartungen:

Die Welligkeiten im Frequenzgang ([siehe: 7.4.3](#)) haben ein stark „gefärbtes“ Signal zur Folge. Zudem entsteht durch das Verhalten der Schallwellen am Reflektor ein sehr höhenbetontes Signal. Dies wird noch verstärkt durch die nicht vorhandene Reflexion tieffrequenter Schallanteile.

Das Resultat ist ein sehr präserter, „trockener“, „harter“ und „metallisch“ wirkender Klangeindruck. Schüsse und Dribblings klingen direkt und nahe.

Vorteilhaft ist die gute Durchsetzungsfähigkeit des Mikrofons in der Mischung. Die „Aggressivität“ des Klangs kann auf den Zuhörer jedoch schnell „übertrieben“ und „aufgesetzt“ wirken. Nimmt man den natürlichen, nicht technisch beeinflussten Höreindruck als Referenz, so erscheint das reflektierte Geräusch „künstlich“.

Das reine Kugelmikrofon ohne Reflektor ist hier sehr viel „neutraler“. Die Distanz zum Schallereignis von immerhin 15 m ist klanglich klar erkennbar. Das Signal besitzt mehr „Volumen“ und „Räumlichkeit“. Die starke Höhenbetonung entfällt, wodurch das Kugelmikrofon in der direkten Gegenüberstellung fast schon „dumpf“ klingt.

Der „Störabstand“ zwischen Umgebungsschall und den Schüssen ist viel geringer. So ist deutlich ein tieffrequentes „Grummeln“ der Atmo hörbar.

Der direkte Vergleich einer Spektralanalyse (nächste Seite), bei welcher beide Mikrofontypen mit dem gleichen Schallereignis „beschallt“ werden, veranschaulicht die Klangunterschiede auch grafisch.

Bis zu einer Frequenz von knapp 250 Hz unterscheiden sich die Mikrofone kaum. Oberhalb dieser Marke sind Differenzen in Nutz- sowie Störschall ersichtlich. So verringert sich der Störschall beim „Parabilmikrofon“ steilflankig bis 500 Hz. Oberhalb ca. 1,5 kHz sind keine nennenswerten Störschalle mehr vertreten.

Beim „KM83i“ ist die Störschallabnahme „flacher“. Es sind Störanteile bis knapp 3 kHz auffindbar.

Das „Nutzsinal“ beim „Parabilmikrofon“ erhält eine abweichende Klangcharakteristik. Gerade die Frequenzen oberhalb 1 kHz sind wesentlich stärker im Gesamtsignal vorzufinden.

Hingegen ähnelt der Verlauf des mit dem Kugelmikrofon aufgenommenen „Kicks“ noch stark dem in [4.2.2](#) gewonnenen Klangeindruck.

Hier die grafische Gegenüberstellung des zeitlichen sowie frequenzmäßigen Verlaufs eines ausgewählten Schusses, der parallel sowohl mit dem „Parablmikrofon“ als auch einem Kugelmikrofon aufgenommen wurde:

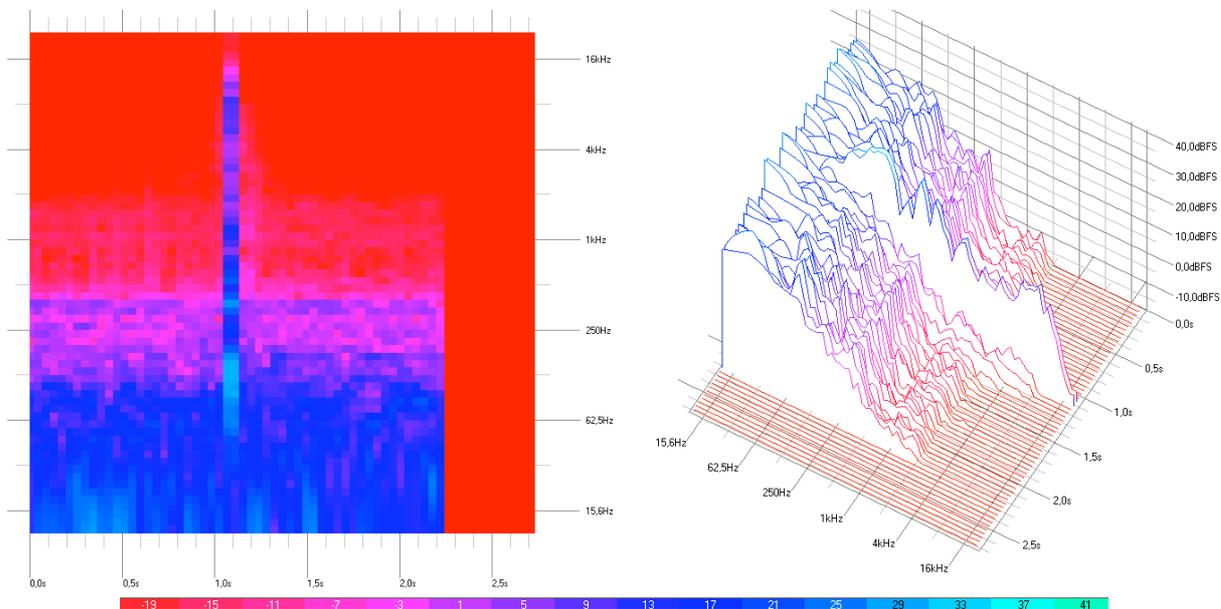


Bild 31. Spektralanalyse des Geräusches „Schuss“, aufgenommen mit dem „Parablmikrofon“ aus 15 m Distanz. Die Auswirkungen des Reflektors auf den hochfrequenten Anteil des Signals sind deutlich.

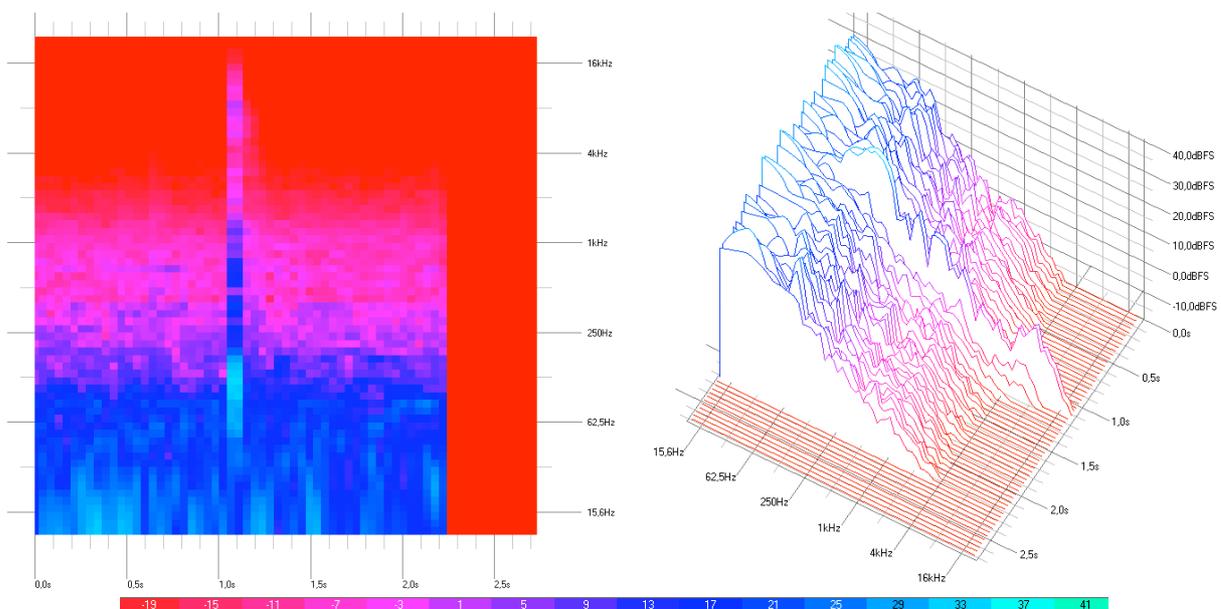


Bild 32. Das selbe Schallereignis, zeitgleich mit einem Kugelmikrofon Typ „Neumann KM83i“ aus 15 m Distanz aufgenommen. Der „Kick“ wird in seiner spektralen Zusammensetzung kaum beeinflusst.

Weitere Diagramme zum Mikrofonvergleich in finden sich in [Anhang B](#).

Es soll an dieser Stelle noch auf die Klangfarbenänderung nicht frontal einfallenden Schalls beim „Parabilmikrofon“ eingegangen werden. Hierzu sei auf nachstehendes Messdiagramm verwiesen, in welchem die Übertragungsfunktionen der Schalleinfallswinkel von 0° bis 45° zusammengefasst sind.

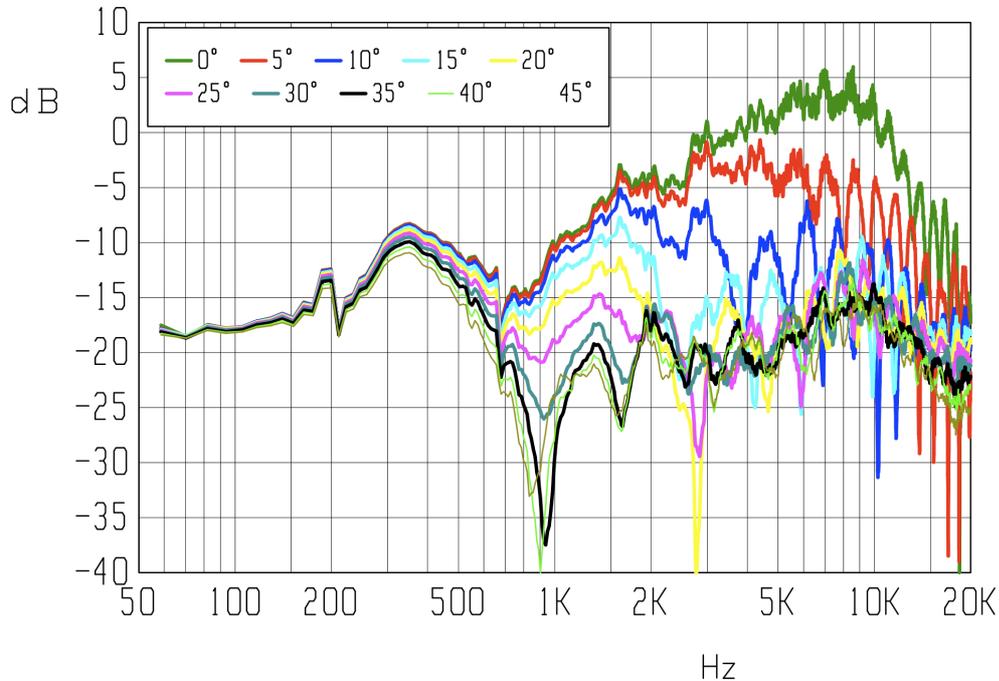


Bild 33. Die Übertragungsfunktionen des „Parabilmikrofons“ für die Einfallswinkel von 0° bis 45° in Schritten von 5° . Die Kurven gelten für direkten Schalleinfall aus der jeweiligen Richtung. In [Anhang E](#) sind die Frequenzgänge zu besserer Deutung einzeln aufgeführt.

Im Diagramm wird deutlich, dass für die dargestellten Einfallswinkel die Frequenzgänge bis etwa 800 Hz relativ „parallel“ verlaufen. In höheren Frequenzbändern zeichnet sich hingegen ein merklicher Unterschied zwischen den verschiedenen Einfallswinkeln ab. So lässt sich im Bereich um 8 kHz bereits eine Differenz von ca. 8,5 dB zwischen 0° und 5° ausmachen. Die Variation bezieht sich dabei nicht nur auf den Pegel. Beispielsweise sind bei 5° die „kammfilterartigen Welligkeiten“ in einem sehr ausgeprägten Maß vertreten. Bei 10° nimmt dieser Effekt noch weitreichendere Formen an.

Für die Winkel ab 20° bis 45° befinden sich die Kurven in nah beieinander liegenden Bereichen. Die „Welligkeiten“ gleichen sich etwas an. Interessant ist das Spektrum zwischen 1 kHz und 2 kHz, in welchem jede Einfallswinkel eine ähnliche Charakteristik vorweist. Mit zunehmender Abweichung von 0° entsteht jedoch ein immer bedeutenderes Minimum bei ca. 1 kHz. Außerdem hat die Steigerung des Winkels von 0° auf 45° eine Abnahme des Schalldrucks am Mikrofon zur Folge.

9 Signalbearbeitung beim „Parabilmikrofon“

Eine nachfolgende Klangbearbeitung bzw. Entzerrung des vom „Parabilmikrofon“ abgegebenen Signals erscheint als Resultat von [8.2](#) angebracht, wenn nicht sogar notwendig.

Durch den starken „Höhenanstieg“ des „Parabilmikrofons“ wird die Luftabsorption hoher Frequenzen, welche der Schall auf dem Ausbreitungsweg erfährt, mehr als kompensiert. In unserem Fall muss der hochfrequente Bereich zusätzlich eine Dämpfung erfahren.

Es ist jedoch denkbar, dass die größeren Entfernungen eines Stadions die Höhenbetonung der Signale durch Dissipation etwas abmildern ([siehe: 4.5.3](#)).

9.1 Entzerrung des Mikrofonsignals

Unter „Entzerrung“ oder „Filterung“ wird die Bearbeitung des Frequenzspektrums des Mikrofonsignals verstanden. Bestimmte Bereiche sollen angehoben oder bedämpft werden, um das Signal in die gewünschte Klangrichtung zu „formen“.

Es lässt sich so der Klangcharakter eines Signals detailliert kontrollieren. Beispielsweise kann ein bearbeiteter „Ballkick“ sehr „aggressiv“ geformt sein oder eher „weich“. Dies hat unmittelbaren Einfluss auf die Wahrnehmung des Spiels durch den Fernsehzuschauer, oder besser gesagt: den Zuhörer. So kann ein „harter Kick“ die Hektik in einer entscheidenden Spielsituation besonders hervorheben.

Es muss also nicht immer die neutrale, technisch korrekte Bearbeitung das Ziel der Entzerrung sein. Die persönliche Vorstellung vom gewünschten Endergebnis ist entscheidend.

In der Folge wird versucht, den Klangcharakter des „Parabilmikrofons“ durch Filterung „natürlicher“ zu gestalten. Hiermit ist ein Signal gemeint, welches beim Hörer denselben Eindruck hervorruft, wie er zum Zeitpunkt der Wahrnehmung des realen Schallereignisses entsteht.

Die Entzerrung des „Parabilmikrofons“ wurde mit der Software „Pro Tools LE 7.3.1“ durchgeführt. Verwendet wurde das darin enthaltene Software-Plug-In „7-Band-EQ“. Die zu bearbeitenden Signale entstammten wieder dem „Edirol R4“. Es fanden die „Testsignale“ aus [8](#) Verwendung.

Die „Kicks“ wurden mit den Mikrofonen aus 15 m „anvisiert“. Die Schallquellen liegen daher auf der frontalen 0°-Achse von „Parabilmikrofon“ sowie „KM83i“. Wie sich aus den Frequenzgängen von 0° bis 45° ableiten lässt ([siehe: Anhang E](#)), ist für jeden Einfallswinkel eine separate Entzerrer-Einstellung notwendig. Andernfalls wird das Klangbild für leicht seitlichen Schall zusätzlich durch „falsche“ Filterung verändert.

Als „technische“ Referenz für die vorzunehmende Entzerrung gilt das Signal des parallel zum „Parabilmikrofon“ aufgenommenen „KM83i“ ([siehe: 8.1](#)). Hier klingt das Ergebnis vom Frequenzspektrum her bereits ohne Bearbeitung relativ ausgewogen und der erwarteten Hörwahrnehmung des Ereignisses angepasst.

Neben technischen Parametern soll als Anhaltspunkt auch der aus Hörerfahrung und Erwartungshaltung entstehende Klangeindruck vom Schallereignis „Ballschuss“ gelten.

Da im Signal des „Parabilmikrofons“ geringe, tieffrequente Störanteile ausgemacht werden konnten, wurde zunächst ein Hochpassfilter mit einer Steilheit von 12 dB / Oktave bei einer Frequenz von 80 Hz angewendet. Das Filter ist so dimensioniert, dass nur die Störungen bedämpft werden. Eine klangliche Beeinflussung des „Kicks“ konnte nicht herausgehört werden. Stellenweise auftretende Windgeräusche erfuhren durch eine leichte, schmalbandige Absenkung bei ca. 240 Hz eine Dämpfung.

Nun sollte eine Reduzierung der „Aggressivität“ des Schallsignals erfolgen. Das stärkste Potenzial für den „harten“ Klang wurde knapp unterhalb 6 kHz festgestellt. Daher entschied sich der Autor zu einer etwas breitbandigeren Absenkung um bis zu 10 dB in diesem Frequenzbereich. Ein angenehmer „Nebeneffekt“ der zwischen 3 kHz bis 8 kHz vorgenommenen Dämpfung war die gute Unterdrückung des zuvor noch vertretenen „Baumrauschens“ (Laub).

Es ergab sich so ein wesentlich „weicheres“ Signal, allerdings mit „dumpfem“, wenig brillantem Charakter. Durch eine vorsichtige Anhebung der Frequenzen ab 10 kHz mittels eines „Shelving-Filters“ konnte dem „Kick“ wieder ein Teil seiner ursprünglichen „Klarheit“ verliehen werden. Das Signal klingt „heller“ und bekommt mehr „Definition“.

Der Versuch, dem „Parabilmikrofon“ mehr „Volumen“ bzw. „Raum und Tiefe“ im Klang aufzuprägen war nicht erfolgreich.

Denn die tieffrequenten Anteile des Nutzsignals gehen in den Umgebungsgeräuschen unserer „Testsituation“ unter. Sie besitzen eine zu geringe

Pegeldifferenz zum umgebenden Störschall. Maßgeblich hierfür ist die vernachlässigbare Reflexionswirkung des Paraboloiden für den tiefen Frequenzbereich.

Wegen der wesentlich höheren Störpegel in einem Stadion kann dort von einer noch größeren Problematik für das tiefe Frequenzband ausgegangen werden.

Durch die Filterung mittels Equalizer gelingt es lediglich, den „Kick“ in seiner „Aggressivität“ etwas abzumildern. Die ursprüngliche Präsenz des Signals ist dabei noch immer vorhanden. Auch das gefilterte Klangereignis hat einen „direkten“ Klangcharakter.

Das Ziel einer „natürlichen“ Wiedergabe der Feldgeräusche lässt sich nur durch „Filterung“ kaum erreichen. So ist keine Tiefenanhebung des Nutzschalls möglich, ohne gleichzeitig den Störschall, welcher in diesem Bereich stark vertreten ist, mit anzuheben.

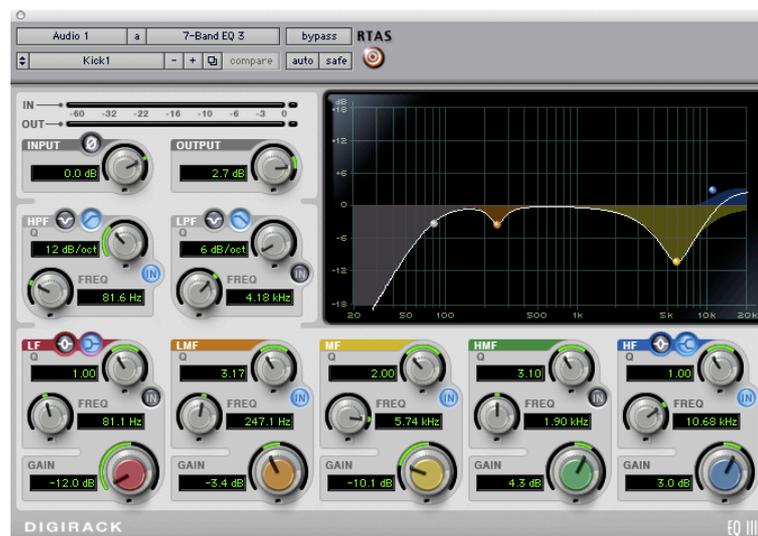


Bild 34. Entzerrer-Einstellung des „Parablmikrofons“ für ein Schallereignis aus der Richtung 0°. Auf eine Anhebung tiefer Frequenzen sollte wegen Störschall verzichtet werden.

9.2 Ausblick: Frequenzgangkompensation

Ein Ansatz, der helfen könnte ein „ausgeglicheneres“ Signal zu erzeugen, wäre die teilsynthetische Reproduktion der tieffrequenten Schallanteile des Nutzschalls.

Wie in den Frequenzanalysen erkenntlich wurde, haben die betreffenden Geräusche eines Fußballspiels durchaus Energie im „tiefen Bereich“. Da diese vom „Parabilmikrofon“ nur ungenügend übertragen wird, kommt es zum erwähnten „dünnen“ Klangbild.

Das Prinzip des folgenden Denkansatzes nimmt seinen Ursprung in der Technik der „Spectral Band Replication“ (SBR), einer Entwicklung der Firma „CodingTechnologies“.

Bei SBR handelt es sich um eine Erweiterung zur Qualitätsoptimierung bzw. Effizienzsteigerung gängiger Audiokompressionsverfahren. Beispielsweise kann es in Kombination mit „MPEG Layer2“ angewendet werden oder findet im „MP3pro“ Codec Verwendung.

Wird ein Codec mit SBR erweitert, so kann dieser bei gleichbleibender Klangqualität in einer niedrigeren Bitrate arbeiten. Das zu kodierende Audiosignal wird in seinem Frequenzspektrum stark eingeeengt. Dies geht zu Lasten der Frequenzen im oberen Bereich.

SBR ermöglicht nun, die Frequenzanteile, welche durch eine hohe, verlustbehaftete Kompression nicht erhalten werden können, im Verlaufe der Decodierung wieder herzustellen. SBR rekonstruiert hohe Frequenzen auf Basis der vorhanden Frequenzen im wieder dekodierten Material.

Es ist hierzu allerdings eine gewisse Kenntnis des Ausgangsmaterials vor der Codierung erforderlich. Genauer analysiert der so genannte SBR-Encoder die betreffenden Frequenzanteile des Eingangssignals. Somit entstehen Informationen über Hüllkurve und spektrale Zusammensetzung des später zu replizierenden Frequenzbandes. Die Signaleigenschaften werden als so genannte Steuerdaten für den eingesetzten SBR-Decoder gespeichert.^{172,173}

¹⁷² Vgl. Krafft, S. 3

¹⁷³ Vgl. Kunz, S. 3

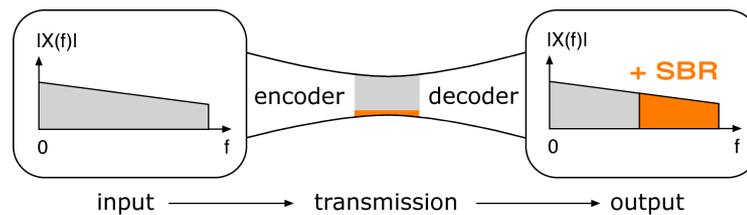


Bild 35. Prinzip der SBR. Das Eingangssignal wird in seiner Bandbreite beschnitten, um weniger Übertragungskapazitäten zu beanspruchen. Beim Empfänger (Decoder) werden die fehlenden, hochfrequenten Anteile durch SBR „künstlich“ hinzugefügt. Für das Projekt müsste diese Funktionsweise auf den tieffrequenten Bereich angewandt werden.

Für das Projekt wäre nun eine Art SBR von Nutzen, welches die tieffrequenten Anteile der Feldgeräusche repliziert. Das „höhenlastige“ Signal des Paraboloiden wird hierdurch mit tiefen Frequenzen ergänzt.

Da die tiefen Frequenzen substituiert werden, kann im ursprünglichen Mikrofonsignal eine Bedämpfung dieser Anteile erfolgen. So kommt es zu einer wesentlichen Reduzierung des Störschalls. Der synthetische Tiefenanteil kann dann an die vorhandenen Frequenzen angepasst werden.

Die für die Charakteristik und Erkennbarkeit des Klages wesentlichen mittleren und hohen Frequenzbereiche werden unverändert beibehalten. Die umfassende Analyse von Pegel- und Frequenzverläufen der Nutzsignale ist Voraussetzung für diese Lösung.

Da wir SBR nicht in Verbindung mit einem verlustbehafteten Codec verwenden wollen, ist eine „Modifikation“ dieser Technik notwendig. Denn die SBR-Analyse wurde für die genaue Replikation eines bestimmten Frequenzbandes entwickelt.

Sie kann die tieffrequenten Störanteile nicht von den Nutzanteilen differenzieren. Als Ergebnis würden dann die störenden Frequenzen ebenso wieder synthetisiert. Aus dem geringen Störabstand resultiert jedoch das beschriebene Problem, nach welchem sich „tiefer Nutzschaall“ nicht ausreichend verstärken lässt.

Daher soll hier ein Weg dargestellt werden, durch welchen mit Hilfe der SBR der tieffrequente Störschaall vom tieffrequenten Nutzschaall getrennt werden kann:

Eine wie bei der Anwendung als Coder-Erweiterung durchgeführte Analyse des zu replizierenden Frequenzbandes genügt nicht. Wegen der hohen Störpegel ist es nicht möglich, die zur Replikation des Nutzschaalls notwendigen Informationen nur

aus Anteilen des „aktuellen“ Signals zu gewinnen. Zusätzlich muss in diesem Fall eine Art „Datenbank für Nutzsoll“ einbezogen werden.

Die „Datenbank“ enthält Informationen zu Hüllkurven und Frequenzspektren einer Vielzahl von Feldgeräuschen. Diese Feldgeräusche werden zuvor in „ruhiger“ Umgebung aufgezeichnet, wodurch sich ein „Vorwissen“ über die zu substituierenden Geräusche ansammelt. Das tieffrequente Spektralband setzt sich deutlich vom Störsoll ab. Dem Original werden so nur Frequenzen des Nutzsolls hinzugefügt.

Die SBR-Analyse vergleicht nun einen Frequenzbereich des aktuellen, „live“ am Mikrofon liegenden Signals mit dem gleichen Frequenzbereich der Signale in der „Datenbank“.

In der „Datenbank“ sind die Schallereignisse nach Kategorien sortiert. Wird eine Übereinstimmung gefunden, so wird das Signal in der „Datenbank markiert“. Es können nun die betreffenden Informationen in Bezug auf dynamischen und frequenzmäßigen Aufbau des „Datenbanksignals“ ermittelt werden.

Beim Mikrofonsignal folgt nun die Begrenzung des Frequenzspektrums. Es wird hier eine steiflankige Hochpassfilterung verwendet, um die tieffrequenten Schalle (Nutzsoll + Störsoll) effektiv zu unterdrücken. Somit wäre der Störsoll nur noch im mittleren und hohen Frequenzbereich vertreten, genauso der Nutzsoll. Durch den guten Störabstand des „Parabilmikrofons“ bei mittleren Frequenzen sind hier Störungen weniger hörbar.

In der Zwischenzeit wurde von der SBR aus den Informationen der „Datenbank“ ein tieffrequentes Band erstellt.

Der replizierte Anteil aus der „Datenbank“ sowie das Hochpass-gefilterte Originalsignal werden zusammengeführt. Auf diese Art kann der tiefe Bereich relativ „nahe am Original liegen“, ohne jedoch die tiefen Frequenzen des Originals genau zu kennen.

Im Prinzip wird der SBR also eine „Datenbank“ mit „Vergleichsfunktion“ zum Original vorgeschaltet. Die konkrete SBR wird nur am Signal der „Datenbank“ durchgeführt. Das Originalsignal kommt mit der SBR nicht in Kontakt. Die verwendete „Vergleichsfunktion“ ist daher sehr wichtig, um ein passendes Frequenzband auszuwählen.

So können tiefe Frequenzanteile über den „Umweg“ eines „Spektralvergleichs“ repliziert werden.

Wie zuvor beschrieben, wird SBR derzeit zur Replikation hoher Frequenzen eingesetzt. Da beim Prozess der teilsynthetischen Erzeugung eines Klangereignisses auch die Eigenschaften unseres Gehörs sowie psychoakustische Effekte eine große Rolle spielen, kann nur schwer abgeschätzt werden, wie erfolgreich der dargestellte Denkansatz sein wird.

10 Die Mikrofon-Nachführung

Neben einer sehr hohen Richtwirkung des einzelnen Mikrofons soll die selektive Schallaufnahme durch die Bewegung und somit optimale Ausrichtung des Mikrofons auf die Schallquelle unterstützt werden. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den heute durchgeführten Mikrofonierungen. Speziell im Fußball kommt eine „starre“ Mikrofonanordnung zum Einsatz, die unabhängig vom Spielgeschehen auf dem Platz von vornherein festgelegte Feldbereiche abdeckt ([siehe: 2.1.1](#)).

Zunächst sollte die Nachführung noch „händisch“, mittels eines hochwertigen Video-Stativkopfes, erprobt werden. Ist dieser Test in der praktischen Umgebung erfolgreich, so kann die Umsetzung der Automation der Schwenkbewegung erfolgen. Dies wäre ein großer Schritt, das System kompakter zu machen und die Nachführung genauer zu steuern. Denn ein Problem bei der manuellen Nachführung ist die zielgenaue Ausrichtung des Mikrofons.

Dadurch können die „Schwankungen“ im Frequenzgang zwischen frontalem und seitlichem Schall hörbar werden. Bei ungenauer Nachführung des Mikrofons entstünde so eine wechselnde Klangfarbe des aufgezeichneten Geräuschs, zusätzlich zur Pegeländerung.

Die durch Metadaten gesteuerte Nachführung der Mikrofone zur Schallquelle ist zentraler Bestandteil des Gesamtprojekts. In einem ersten Schritt soll dies mit einem elektrischen Stellmotor, auf welchem das Mikrofon angebracht ist, realisiert werden.

10.1 Die Steuerungsdaten

Wie bereits angeklungen, soll die dem Spielverlauf angepasste, dynamische Bewegung des Mikrofons automatisiert mittels so genannter „Kamerametadaten“ erfolgen.

Unter dem Begriff „Metadaten“ sind Informationen zu verstehen, die nähere Angaben zum eigentlich aufgezeichneten, sichtbaren Bildmaterial enthalten. Für uns interessant sind Angaben, aus welchen sich die Position des Balls auf dem Feld ermitteln lässt.

Dies können Informationen zu Brennweite, Schärfenebene bzw. eingestellter Objektentfernung zum „scharf“ abgebildeten Objekt sowie Schwenk- und

Neigedaten der erhöhten Führungskamera sein. Die Kombination dieser Daten ist geeignet, die Position des ballführenden Spielers zu ermitteln.

Die Steuerung der Mikrofone orientiert sich hierdurch an den durch die Kameras vorgegebenen Bildausschnitten.

Die Führungskamera folgt stets dem Ball bzw. ballführenden Spieler. Der gewählte Bildausschnitt ist dabei eher weit. Die Führungskamera soll immer einen guten Überblick des Spielgeschehens gewährleisten.

Da andere Kameras auch für Nah- oder Detailaufnahmen genutzt werden, kommt als „Quelle“ der Metadaten nur die Führungskamera in Betracht. Auch während eines Bildschnitts, durch welchen das Sendebild nicht mehr das von der Führungskamera abgegebene Bild zeigt, bleibt diese auf den Ball gerichtet. Als Konsequenz kann „die Nachführung“ die Daten der Führungskamera fortlaufend auswerten. Denn diese ist immer auf das Geschehen direkt um den Ball ausgerichtet.

10.2 Der Stellmotor

Beim momentan zur Verfügung stehenden „Stellmotor“ oder auch „Drehteller“ handelt es sich um einen Prototyp. Da der Motor grundlegende Anforderungen bereits in dieser Phase erfüllt, wurde die weitere Optimierung zunächst eingestellt. Es wird abgewartet, wie erfolgsversprechend sich das Projekt weiterentwickelt.

Die wesentlichen Eigenschaften des Prototyps sind nachfolgend aufgeführt:

Höhe: 33 cm

Grundfläche: 12 cm × 12 cm

Gewicht: 6 kg

Schnittstelle zur Steuerung: RS232

Winkelgeschwindigkeit: ca. 30-40°/s

Die Winkelgeschwindigkeit kann über die genannten Werte hinaus erhöht werden, allerdings mit zunehmender Geräuschentwicklung.

Von höchster Wichtigkeit ist, dass kein weiterer Störschall durch Motorgeräusche oder Vibrationen auf das Mikrofon übertragen wird.

Aufgrund seiner ausgeprägten Geräuschkämmung ist der vorhandene Stellmotor grundsätzlich gut für unser Projekt geeignet. Die Schallisolation der Motorgeräusche ist Voraussetzung. Akustische „Einstreuungen“ des Stellmotors sind nicht akzeptabel.

Ein subjektiver Test ergab eine Geräuschkentwicklung, welche bei ruhiger Umgebung an der Wahrnehmungsgrenze liegt. In einem Fußballstadion sollte das Geräusch des Motors daher nicht mehr hörbar sein.

Nachteil des schallisolierenden Gehäuses ist sein Gewicht und seine Abmessungen. Auch der Übertragung von „Körperschall“ durch Resonanzerscheinungen muss Sorge getragen werden. Umsetzbar wäre dies mit einer „gedämpften“ Mikrofonaufhängung, ähnlich einer „Mikrofonspinne“.

10.2.1 Winkelgeschwindigkeit und Entfernung

Die geforderte Drehgeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit) der Nachführung lässt sich aus den Laufgeschwindigkeiten der Fußballspieler ermitteln. Der Abstand zwischen Spieler und „Drehteller“ hat hier die entscheidende Rolle. Je weiter der Spieler entfernt ist, umso geringer kann die Winkelgeschwindigkeit ausfallen

Somit hängen die notwendigen Parameter auch vom Mikrofonstandort ab.

An dieser Stelle sollen einige Winkelgeschwindigkeiten ermittelt und diese im Anschluss mit den tatsächlichen Möglichkeiten, die der „Drehteller“ bietet, verglichen werden:

Es wird angenommen, der Fußballspieler bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s (36 km/h) über das Spielfeld. Dies ist sicherlich ein Maximalwert. Ein Spieler mit Ball dürfte nicht eine solch hohe Geschwindigkeit erreichen.

Das Mikrofon befindet sich am Standort „Seitenlinie“ ([siehe: 4.4.2](#)). Der Spieler bewegt sich auf direktem Wege vom Anstoßpunkt zur Torlinie.

Dies bedeutet eine variable Strecke r zwischen Spieler und Mikrofon von ca. 45 m am Anstoßpunkt über ein Minimum von 37 m zu einem erneuten Maximum von ca. 45 m an der Torlinie. Am gewählten Standort sind dies Entfernungen, die sehr häufig vorkommen können.

Die höchste Geschwindigkeit muss im Bereich der kürzesten Entfernung zwischen Spieler und Mikrofon erzeugt werden.

Bei einem Minimum von $r = 37$ m muss der Motor eine Winkelgeschwindigkeit von ca. $15^\circ/\text{s}$ erzeugen, um an der Position des Spielers eine Strecke von 10 m/s überstreichen zu können.

Diesen Wert erreicht unser Prototyp mühelos.

Nun ist es jedoch interessant abzuschätzen, wie nahe ein Spieler (10 m/s) dem Mikrofon kommen darf, ohne dass die maximal mögliche Winkelgeschwindigkeit überschritten wird. Aufgrund zunehmender Lärmentwicklung soll von einer maximalen Geschwindigkeit von $40^\circ/\text{s}$ ausgegangen werden.

Steht das Mikrofon an der Seitenlinie, so kann der Spieler bis zu einem minimalen Abstand von 12 m „verfolgt“ werden. Unter dieser Marke ist die Schwenkbewegung des „Drehtellers“ nicht schnell genug um an der Quelle „dran zu bleiben“.

Soll die Drehgeschwindigkeit wegen Motorgeräuschen nicht weiter erhöht werden, kann es zu „ungenauem Nachführverhalten“ des Systems kommen.

In diesem Hinblick ist eine entferntere Position geschickter. Beim Standort „Hauptkamera“ erhöhen sich die Abstände. Ein Spieler kann hier nicht näher als 25 m an das Mikrofon herankommen ([siehe: 4.4.1](#)). Durch die größeren Entfernungen besteht der Vorteil von geringeren Winkelgeschwindigkeiten.

Dadurch verringert sich wiederum die Problematik von Windgeräuschen durch zu schnelle Mikrofonbewegungen.

Die angestrebten Parameter in Beziehung auf benötigte Winkelgeschwindigkeiten sollten mit unserem zur Verfügung stehenden Stellmotor auch hier erreicht werden.

Beim Standort „Hauptkamera“ ergibt sich noch die Problematik des Neigewinkels, der gesteuert werden muss.

Zur geforderten Genauigkeit des Stellmotors soll hier eine kurze Angabe gemacht werden:

Je weiter der Ball entfernt ist, umso genauer muss der Stellmotor arbeiten. Bei großer Nähe ist eher eine hohe Geschwindigkeit als eine „feine“ Auflösung der Drehbewegung gefordert.

Um den Extremfall „durchzuspielen“, soll daher die Mikrofonposition „Hauptkamera“ ([siehe: 4.4.1](#)) gewählt werden.

Gefordert wird, dem Spieler bzw. Ball „auf den Meter“ genau folgen zu können. Die maximale Entfernung bei einer Spielaktion an der gegenüberliegenden Eckfahne liegt bei 121 m (Luftlinie). Soll ausgehend von dieser Entfernung eine Bewegung um 1 m an der Eckposition erfolgen, darf sich der Motor nur um einen Winkel von $0,47^\circ$ verstellen. Dies ist eine extreme Forderung.

Denkt man noch an eventuelle Vibrationen der Kameraplattform, dürfte sie kaum zu erfüllen sein.

Geht man von einer realisierbaren Auflösung von 1° -Schritten aus, so liegt der maximale Abstand bei dem die Bewegung um mindestens 1 m differenziert werden kann bei ca. $r = 57$ m.

11 Ausblick und Resümee

Ein Test des „Parabolkonfons“ unter realen Bedingungen in einem Stadion ist unbedingt zu empfehlen. Nur so kann die Relevanz der Voruntersuchungen dieser Arbeit bestätigt werden.

Leider war ein Praxistest unter Realbedingungen nicht im zeitlichen Rahmen, der für die vorliegende Ausarbeitung zur Verfügung stand, zu organisieren. Hierzu wurden jedoch Kontakte mit Verantwortlichen bei Rundfunkanstalten aufgenommen.

Im Besonderen das ZDF hat Interesse an einem gemeinsamen Probelauf des „Parabolkonfons“. Sobald ein Termin gefunden wird, kann das System einem ersten „Feldversuch“ unterzogen werden. In einem solchen Fall wäre es sinnvoll, eine „Vergleichsmischung“ zwischen dem neuen System und der „traditionellen“ Herstellungsweise zu erstellen. So könnte ein Eindruck von den tatsächlichen Möglichkeiten des „Parabolkonfons“ gewonnen werden.

Es ist vorstellbar, dass ein Praxistest durchaus Erfolg haben kann. Wie mehrfach erwähnt, wurden eher „extreme“ Bedingungen angenommen. Dies gilt sowohl für das Gebiet der Schalldruckverhältnisse als auch der räumlichen Abmessungen eines Fußballstadions.

Die schwache Nutzschallaufnahme bei großen Entfernungen könnte durch mehrere Konfonsysteme etwas kompensiert werden. Auf diese Art würde sich die maximale Aufnahmeentfernung jedes Konfons verringern. Zu beachten sind hier Interferenzeffekte durch Summierung der Signale. Des Weiteren wird mit jedem zusätzlichen Konfon ein hohes Maß an Störschall aufgenommen.

Sollte die manuelle und automatisierte Nachführung eines „Parabolkonfons“ den erhofften Nutzen bringen, so kann dann über die Umsetzung der variablen Richtungsempfindlichkeit in Form eines Konfonarrays nachgedacht werden.

Mit der Arraytechnik könnte das Verhalten eines „Parabolkonfons“ nachgebildet werden. Vorteilhaft ist dabei der mögliche Verzicht auf mechanisch empfindliche, sich bewegende Teile. Sollen weitere Verbesserungen im Bereich der Störschallunterdrückung erfolgen, wird dringend eine tiefer greifende Beschäftigung mit den Möglichkeiten von Konfonarrays bzw. Beamforming empfohlen. Ob ein Konfonarray akustisch und visuell Vorteile gegenüber dem hier vorgestellten „Parabolkonfon“ bietet, muss noch genauer untersucht werden.

Die Verwendung von DSP-Mikrofonen, wie sie Audio Technica mit dem „AT895“ vorantreibt, ist ebenso viel versprechend. So bietet diese Technik eine sehr platzsparende Möglichkeit. Weiter ist sie unkompliziert in bestehenden Infrastrukturen zu verwenden. Die Kombination dieser Technologie mit einem dynamischen, automatisierten Nachführungssystem bietet den Programmgestaltern weitreichende Möglichkeiten in der Tongestaltung ihrer „Produkte“.

Es wird empfohlen, das weiterentwickelte „AT895“, welches nach Auskunft von Audio Technica bis Ende des Jahres Marktreife erlangen soll, einem erneuten Test zu unterziehen.

Die „visuelle Komponente“ muss bei der weiteren Entwicklung beachtet werden. Ein „sperriges“, in den Abmessungen großes System wird in den ohnehin schon recht engen, nur auf Fußball ausgerichteten Arenen zu Sichteinschränkungen führen. Denn die Sichtlinien der Zuschauer sind unter der Forderung eines geringen Abstandes zum Spielfeld sehr „knapp“ kalkuliert.

Wie zu Beginn festgestellt, ist es vielfach Wunsch, einen direkten, bildbezogenen Ton zu produzieren. Durch die zur Verfügung stehende Technik sowie die extremen akustischen Bedingungen ist die Umsetzung dieses Wunsches allerdings nur schwer zu realisieren.

Das ganzheitliche Ziel der Programmveranstalter und produzierenden Firmen von Sportevents ist zweifellos eine innovative, packende und intensive Übertragung des betreffenden Sportereignisses. Die verbesserte akustische Wahrnehmbarkeit der Feldgeräusche beim Fußball kann hier einen großen Beitrag leisten.

Daher werden technische Lösungen, welche ein Erreichen dieser Zielsetzung vereinfachen bzw. erst ermöglichen, durchaus eine Chance erhalten.

12 Anhang**Anhang A: Schalldruckpegel Nutzscha**

Spielaktion	Schalldruckpegel in dB (A)
Torschuss	Entfernung „Ball“ zu „Messmikrofon“ = 1 m
	95,1
	89,1
	88,1
	86,1
	89,6
	84,2
	88,6
	90,4
	85,1
Torschuss	Entfernung „Ball“ zu „Messmikrofon“ = 2 m
	79,9
	80,4
	82,7
	82,4
Pass	Entfernung „Ball“ zu „Messmikrofon“ = 1 m
	81,8
	81,5
	78,2

Anhang B: Frequenz- und Zeitverlauf Nutzschall

Kugelmikrofon „KM83i“, 1 m

Torschüsse:

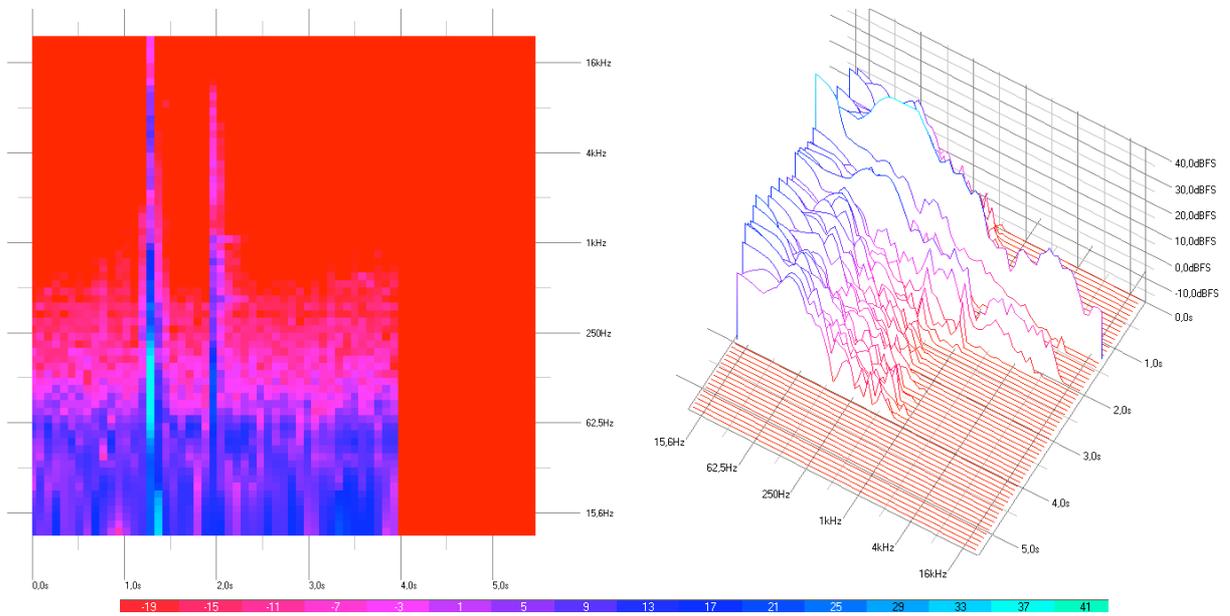


Bild A1. Frequenz-/Zeitverlauf eines Torschusses. Aufnahme­distanz 1 m. Mikrofon: „Neumann KM83i“.

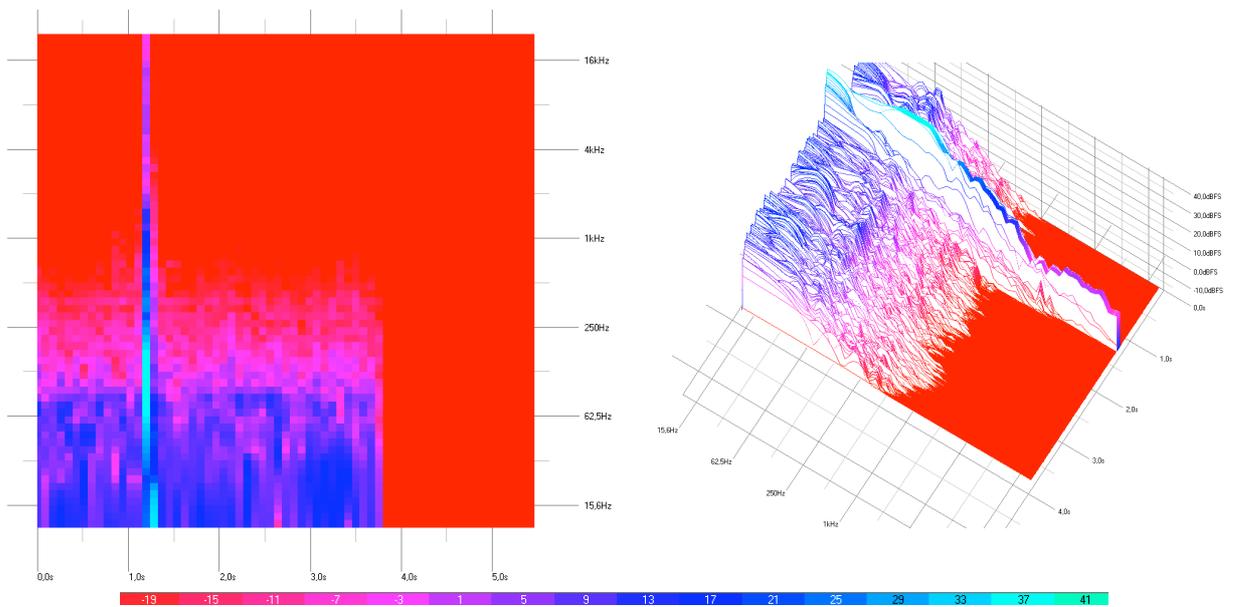


Bild A2. Frequenz-/Zeitverlauf eines Torschusses. Aufnahme­distanz 1 m. Mikrofon: „Neumann KM83i“.

Torschüsse:

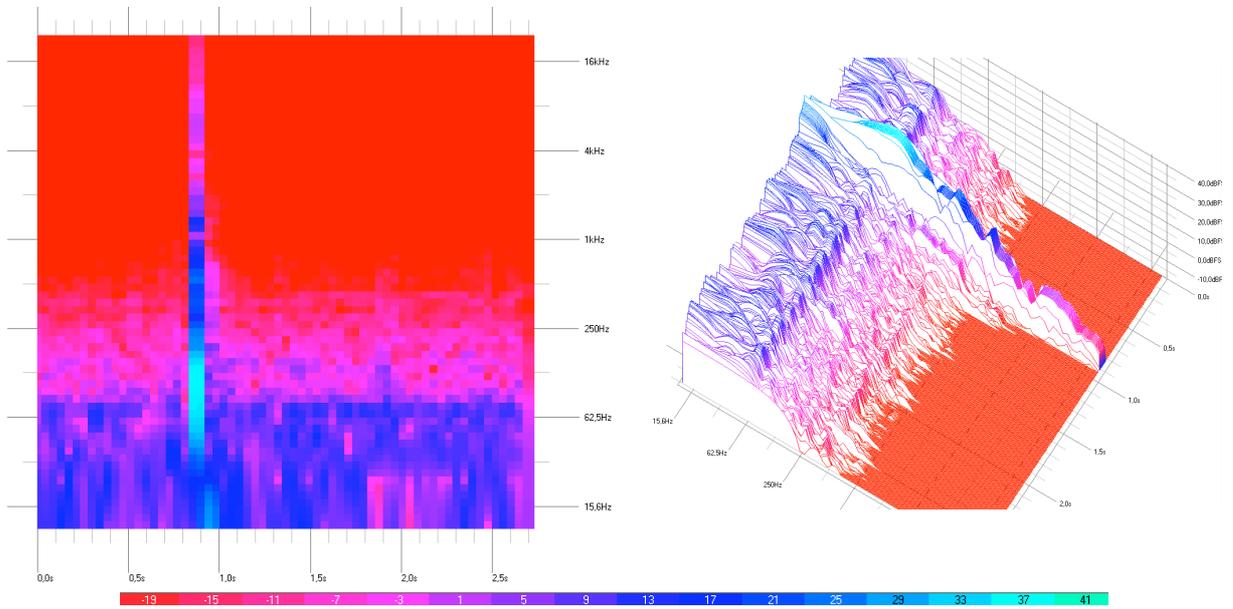


Bild A3. Frequenz-/Zeitverlauf eines Torschusses. Aufnahmedistanz 1 m. Mikrofon: „Neumann KM83i“.

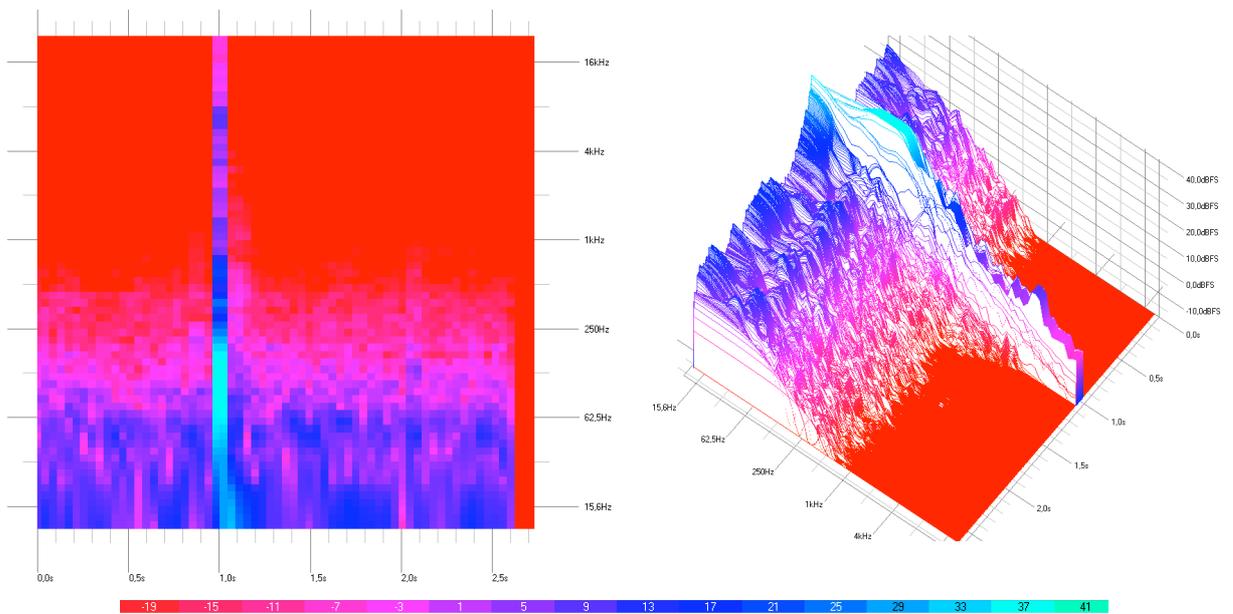


Bild A4. Frequenz-/Zeitverlauf eines Torschusses. Aufnahmedistanz 1 m. Mikrofon: „Neumann KM83i“.

Vergleich von „Parabilmikrofon“ mit „KM83i“, 15 m

„Schuss 1“:

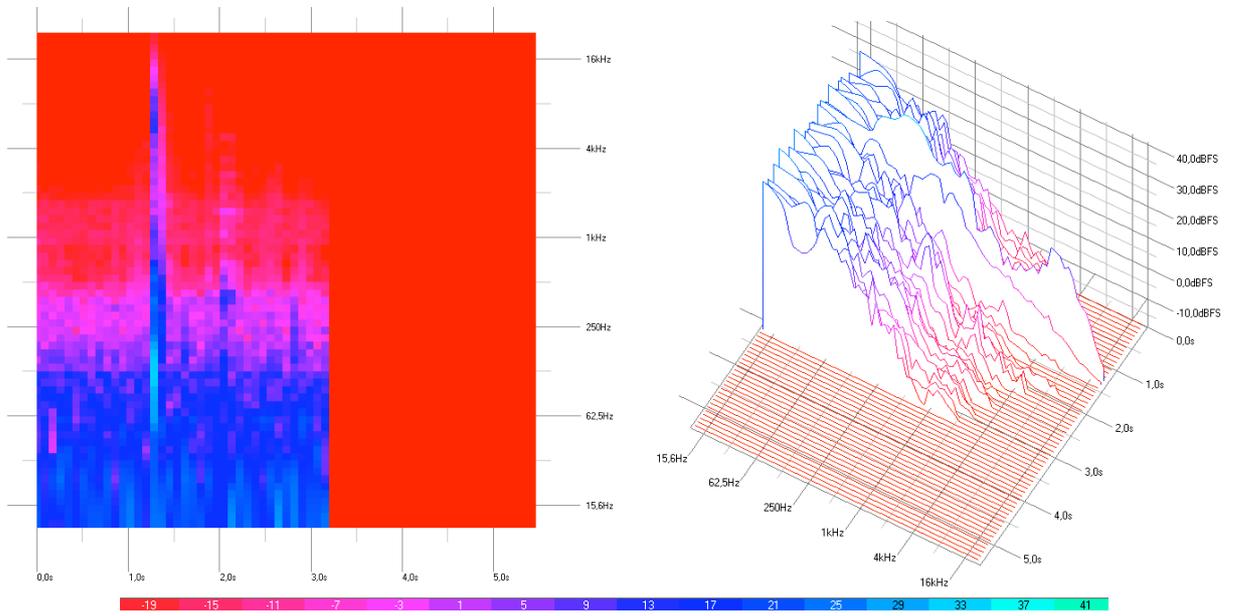


Bild A5. Frequenz-/Zeitverlauf „Schuss 1“. Aufnahmedistanz 15 m. Mikrofon: „Parabilmikrofon“.

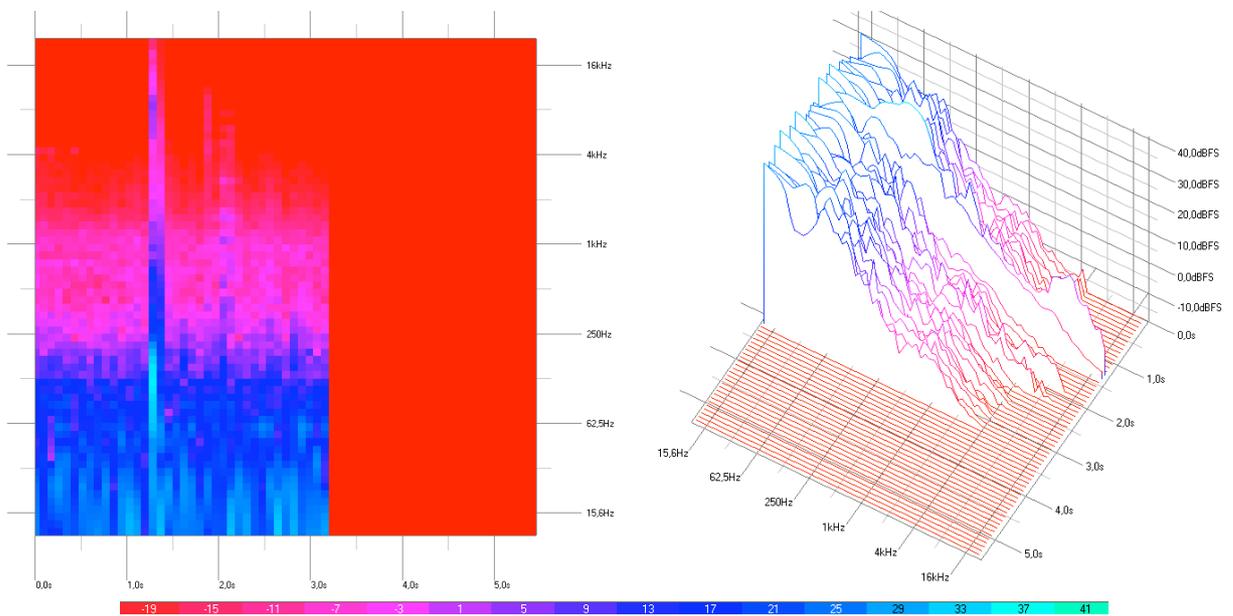


Bild A6. Vergleich „Schuss 1“. Aufnahmedistanz 15 m. Mikrofon: „KM83i“.

„Schuss 2“:

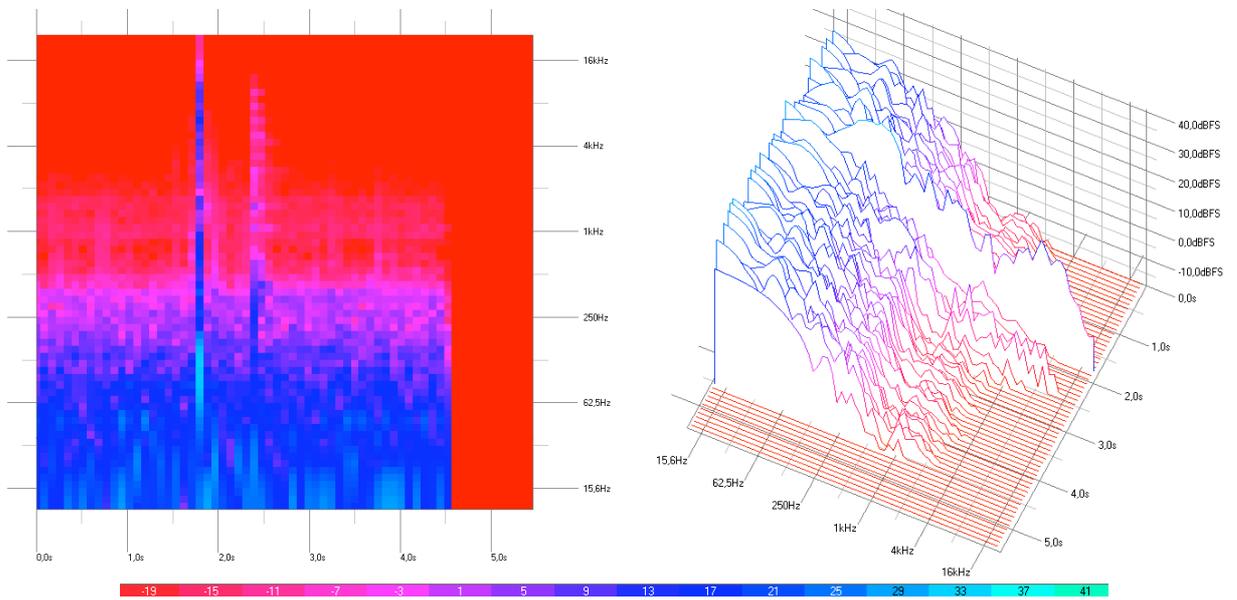


Bild A7. Frequenz-/Zeitverlauf „Schuss 2“. Aufnahmedistanz 15 m. Mikrofon: „Parabolmikrofon“.

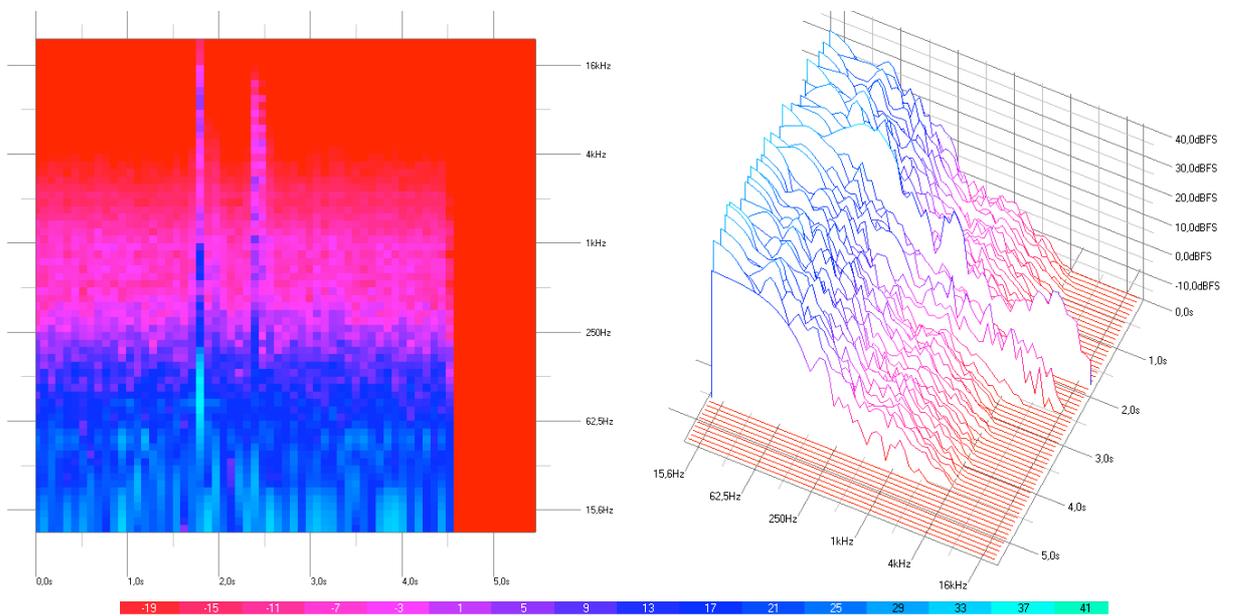


Bild A8. Vergleich „Schuss 2“. Aufnahmedistanz 15 m. Mikrofon: „KM83i“.

Anhang C: Bereich der Hauptkamera (FIFA-Empfehlung)

**Bereich für Hauptkamera
(nach FIFA - Empfehlung)**

FIFA - Vorgabe:

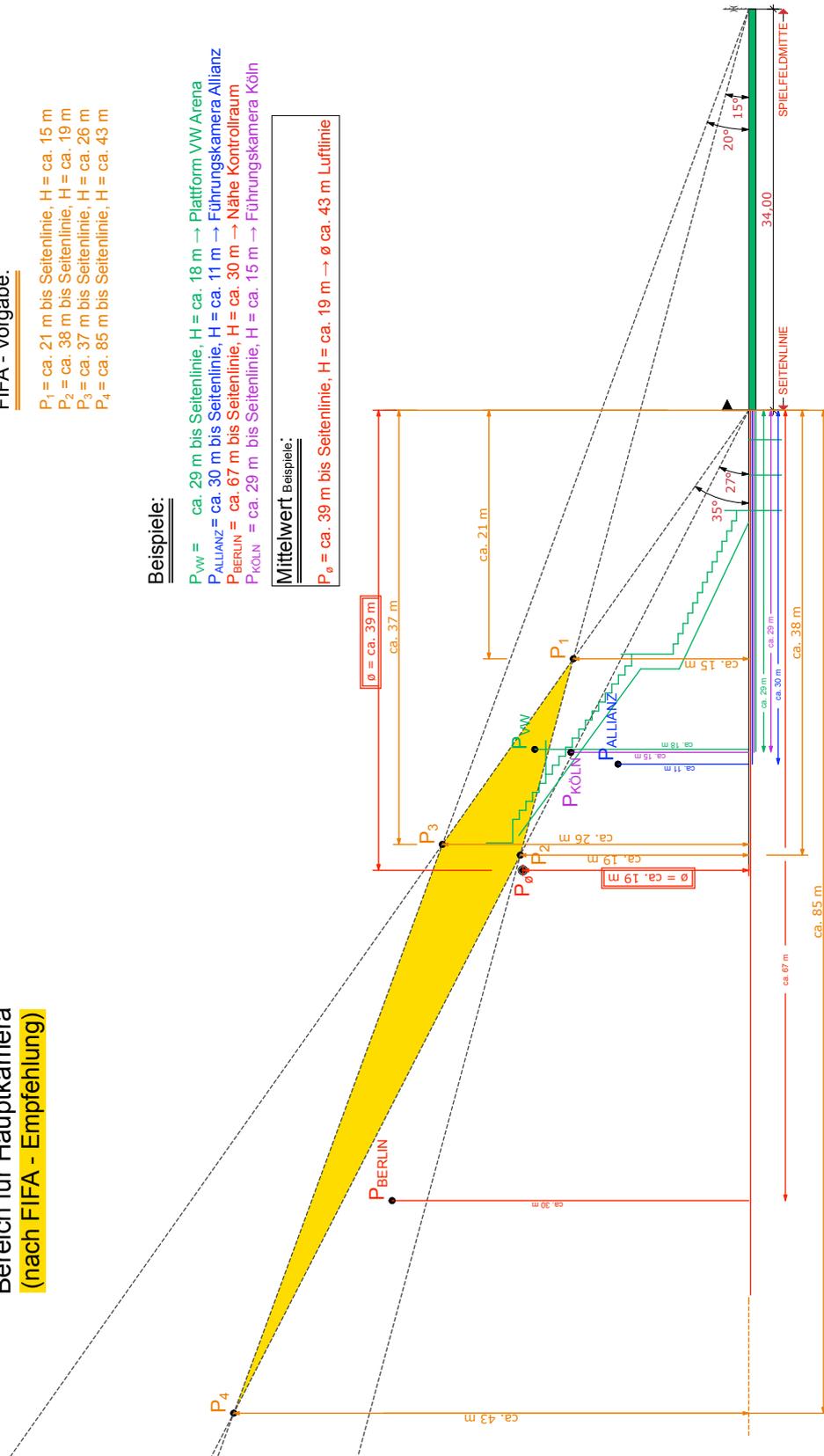
- P₁ = ca. 21 m bis Seitenlinie, H = ca. 15 m
- P₂ = ca. 38 m bis Seitenlinie, H = ca. 19 m
- P₃ = ca. 37 m bis Seitenlinie, H = ca. 26 m
- P₄ = ca. 85 m bis Seitenlinie, H = ca. 43 m

Beispiele:

- P_{VW} = ca. 29 m bis Seitenlinie, H = ca. 18 m → Plattform VW Arena
- P_{ALLIANZ} = ca. 30 m bis Seitenlinie, H = ca. 11 m → Führungskamera Allianz
- P_{BERLIN} = ca. 67 m bis Seitenlinie, H = ca. 30 m → Nähe Kontrollraum
- P_{KÖLN} = ca. 29 m bis Seitenlinie, H = ca. 15 m → Führungskamera Köln

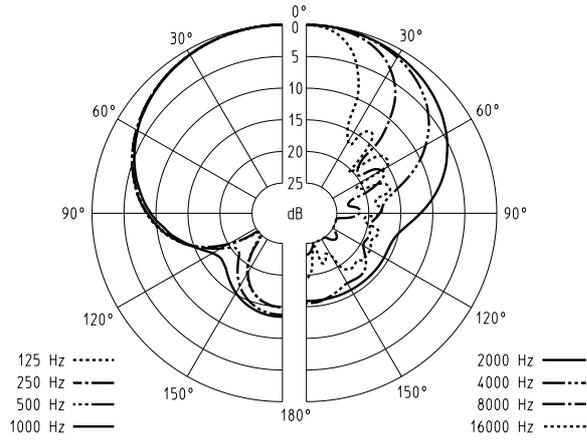
Mittelwert Beispiele:

- P_Ø = ca. 39 m bis Seitenlinie, H = ca. 19 m → Ø ca. 43 m Luftlinie

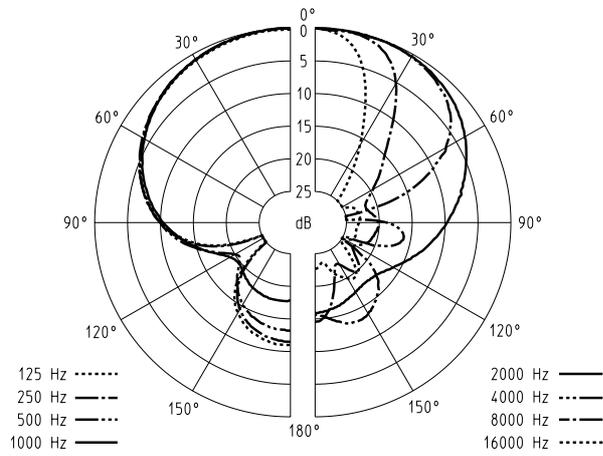


Anhang D: Übersicht Richtrohre

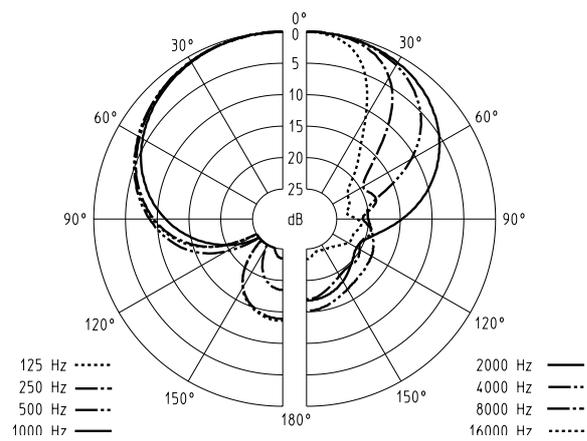
Mikrofonbezeichnung	ca. Preis
Sennheiser MKH416	900,-
Sennheiser MKH60	1600,-
Sennheiser ME66	199,- (+ Speiseteil K6)
Sennheiser MKH70	1750,-
Sennheiser ME67	259,-
Speiseadapter K6 und K6P	200-260,-
Schoeps CMIT-5U	1700,-
Rode NTG1	199,-
Rode NTG2 (wahlweise Batterieversorgung)	239,-
Neumann KMR81/82	1500,-
Beyerdynamic MCE 86 S2	295,-
Beyerdynamic SHM 805 A	250,-
Beyerdynamic MC836/837	800,-
Audio Technica AT4071a	-----
Audio Technica AT815b	270,-
Audio Technica AT895	2500,-
AKG CK98 (nur Kapsel, zusätzlich Speiseteil SE300B)	270,-
AKG CK69 ULS (teilbares Richtrohr)	570,-
Sanken CS-3e	930,-
Ambient Recording TinyMike ATM 216	439,-



Richtdiagramm Sennheiser MKH416

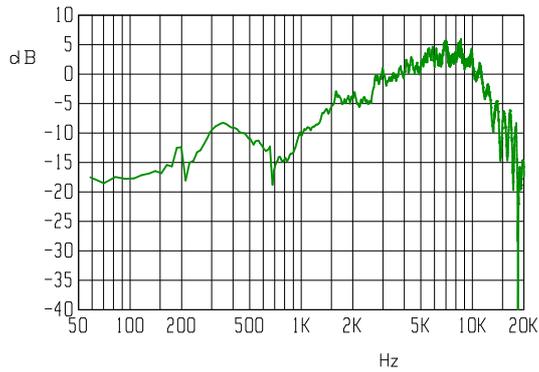


Richtdiagramm Sennheiser ME66

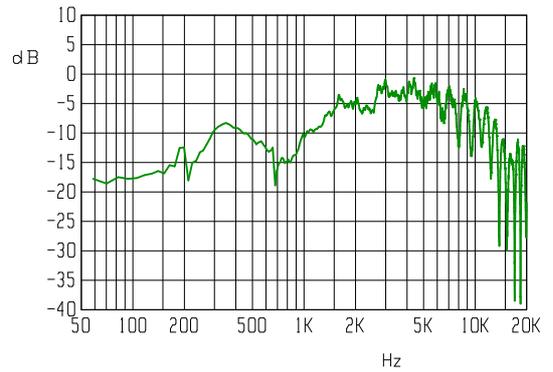


Richtdiagramm Sennheiser MKH60

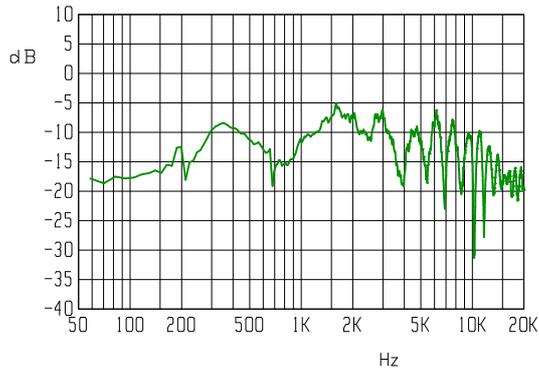
Anhang E: Frequenzgänge „Parabolmikrofon“ von 0° bis 45°



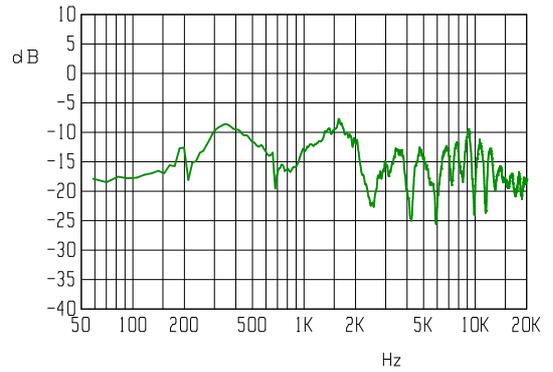
0°, schmalbandig, „Parabolmikrofon“



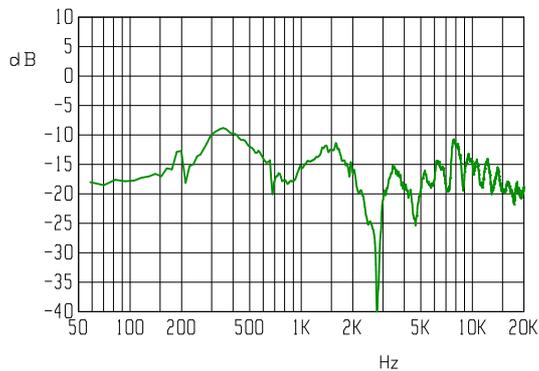
5°, schmalbandig, „Parabolmikrofon“



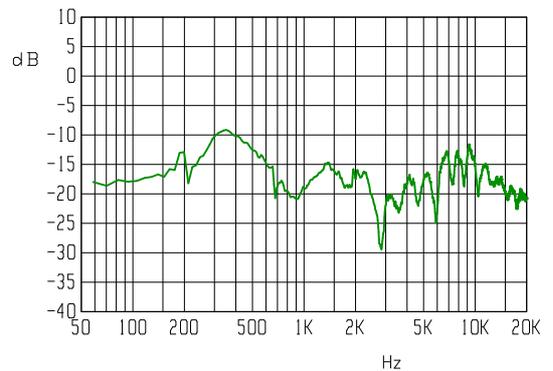
10°, schmalbandig, „Parabolmikrofon“



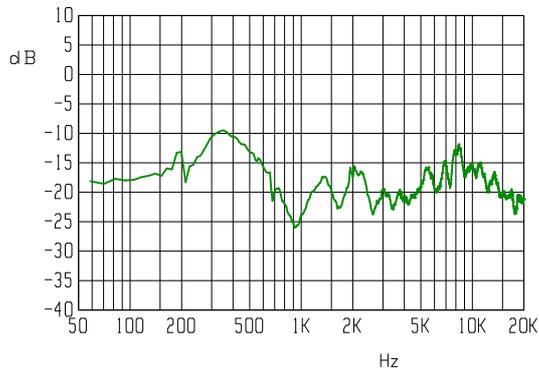
15°, schmalbandig, „Parabolmikrofon“



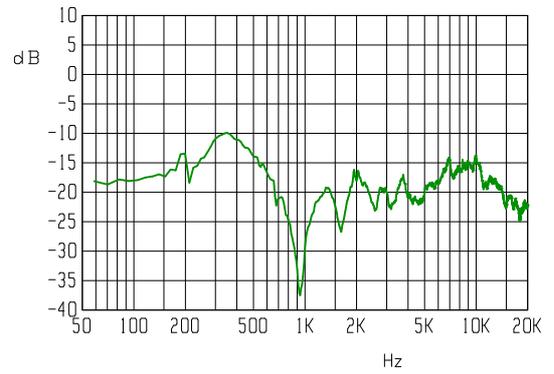
20°, schmalbandig, „Parabolmikrofon“



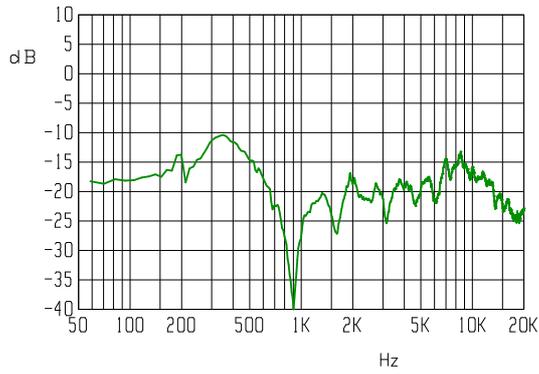
25°, schmalbandig, „Parabolmikrofon“



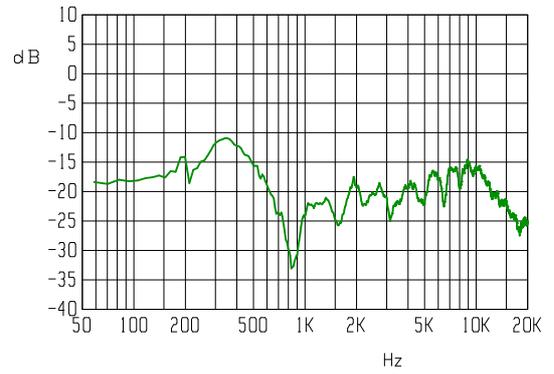
30°, schmalbandig, „Parabilmikrofon“



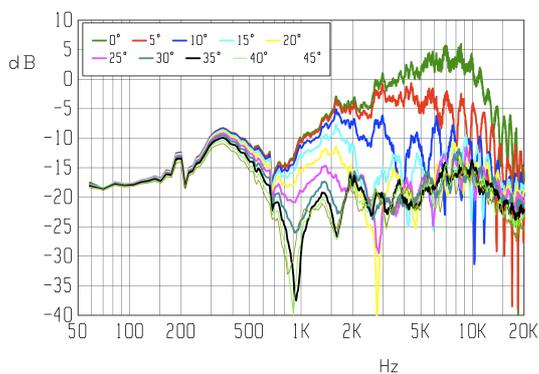
35°, schmalbandig, „Parabilmikrofon“



40°, schmalbandig, „Parabilmikrofon“



45°, schmalbandig, „Parabilmikrofon“



0° bis 45°, schmalbandig, „Parabilmikrofon“

13 Buchverzeichnis, alphabetisch

Ahnert, Wolfgang: Simulation von Großbeschallungen. - Acoustic Design Ahnert, 2003 - Internet: 1.6.2007

Audiomatica: The MLS Analysis Technique and CLIO. Internet: <http://www.mclink.it/com/audiomatica/download/cliomls.pdf>, 25.9.2007

Audio Technica: AT895 - Installation and Operation. - Leeds : Audio Technica Limited, 1999

Audio Technica: Produktkatalog 2006. Internet: <http://www.audio-technica.com>, 13.4.2007

Backman, Juha: Parabolic Reflector Microphones. In: AES Convention <112, 2002, München>. Convention Paper No. 5499

Baxter, Dennis: A Practical Guide To Television Sound Engineering. - Oxford : Elsevier Focal Press, 2007

Borucki, Hans: Einführung in die Akustik. - Mannheim (u.a.) : B.I. Wissenschaftsverlag, 1973

Boye, Günther: Handbuch der Elektroakustik. - 3. Aufl. - Heidelberg : Hüthig, 1989

Boye, Günther: Modern Audio Systems for Open Air Stadiums. In: AES Convention <59, 1978, Hamburg>. Preprint No. 1323

Brüel & Kjaer: Beamforming. Technical Review No. 1 - 2004 Internet: <http://www.bksv.com/default.asp?ID=3080>, 25.4.2007

Brüel & Kjaer: Measuring Microphones. Internet: <http://www.bksv.com/default.asp?ID=3080>, 24.7.2007

Brüel & Kjaer: Microphone Handbook. - Vol.1 - Theory. - Naerum : Brüel & Kjaer, 1996. Internet: <http://www.bksv.com/default.asp?ID=3080>, 24.7.2007

Cremer, Lothar ; Müller, Helmut A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. - Band 1. - 2. Aufl. - Stuttgart : S. Hirzel Verlag, 1978

DEGA: Akustische Wellen und Felder. - DEGA Empfehlung 101 - Berlin : Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2006. Internet: http://www.dega-akustik.de/Publikationen/DEGA_Empfehlung_101, 24.7.2007

Deutschlandfunk: Fernrohr für Schall. Internet: <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/668213/>, 19.9.2007

DFL: Durchführungsbestimmungen für die Spiele der Bundesliga und 2. Bundesliga. Anlage 4 - Internet. 11.9.2007

Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik. - Band 1. - 6. Aufl. - München : K.G. Saur, 1997

Dickreiter, Michael: Mikrofonaufnahmetechnik. - 2. Aufl. - Stuttgart : Hirzel, 1995

Dittmar, Manfred: Schall und Schallausbreitung. - SRT-Schriftenreihe Band 6. - 2. Aufl. - Nürnberg : Schule für Rundfunktechnik, 1990

Fasold, W. ; Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 2. Aufl. - Berlin : Verlag Bauwesen, 2003

FIBA: FIBA Television Manual. Internet: <http://www.fiba.com>, 16.3.2007

FIFA: Fußballstadien. - Technische Empfehlungen und Anforderungen. - 4. Aufl. Internet: <http://de.fifa.com/worldcup/organisation/documents/index.html>, 1.6.2007

FIFA: Technische Empfehlungen und Anforderungen für den Neubau oder die Modernisierung von Fußballstadien. Internet. 1.6.2007

Goertz, Anselm: Planung und Einmessung von Beschallungsanlagen. Internet: http://www.anselmgoertz.de/Page10383/Aktuell_dt/A-Goertz-TMT-2006-Workshop.pdf, 16.3.2007

Goertz, Anselm: Projektierung, Installation und Inbetriebnahme der Beschallungsanlage im Moskauer Luzhniki Stadion. Internet: http://www.anselmgoertz.de/Page10383/Anselm_Goertz_dt/Veroeffentlichungen_dt/daga98.pdf, 16.9.2007

Heckl, M. ; Müller H.: Taschenbuch der technischen Akustik. - 2. Aufl. - Berlin (u.a.) : Springer, 1994

Henn, Hermann: Ingenieurakustik. - 2. Aufl. - Braunschweig (u.a.) : Vieweg, 1999

Juncker, Gerhard: Einführung in die Raumakustik und Beschallungstechnik. Internet: <http://gerhard.junker.info/publikationen/skripten/raumakustik.htm>, 13.8.2007

Kern, Josef: Errichtung des Fußballstadions Salzburg. - Porr-Nachrichten, S. 19 - 24 - Internet: <http://www.porr-ag.de/pdf/Nachr143.pdf>, 5.6.2007

Krafft, Wolfgang ; Stoll, Gerhard: Optimierung der Audiocodierung durch Spectral Band Replication in DAB - Konsequenzen für die Hörer. - München : Institut für Rundfunktechnik

Kunz, Oliver: SBR explained: White paper. Internet: <http://www.codingtechnologies.de>, 24.10.2007

Kuttruff, Heinrich: Akustik. - Stuttgart : S. Hirzel Verlag, 2004

Malmlund, Wilfred A.: Sound Amplification Systems for San Diego All American Stadium. In: AES-Journal, Vol.17 (1969) ,No.5, S. 560 - 571

Mapp, Peter: The Effects of Spectators, Audiences and Buildings on Sound System Performance. In: AES Convention <98, 1995, Paris> Preprint No. 3964

Marchesi, Jost J.: Photokollegium 2. - 10. Aufl. - Gilching : Verlag Photographie, 2002

Meyer, Erwin ; Neumann, Ernst-Georg: Physikalische und technische Akustik. - 3. Aufl. - Braunschweig (u.a.) : Vieweg, 1979

Neufert, Ernst: Bauentwurfslehre. - 35. Aufl. - Braunschweig (u.a.) : Vieweg, 1998

Nixdorf, Stefan: Sichtlinien und Sicherheit. - Köln : Sportverlag Strauß 2007

NTI: Acoustilyzer „AL1“ Handbuch. - Version 1.30d - Schaan : NTI AG, 2006

Olson, Harry F.: Acoustical Engineering. - New York : Van Nostrand, 1957

Owens, Jim: Television Sports Production. - 4. Aufl. - Oxford : Elsevier Focal Press, 2007

Peutz ; Breuer ; Rijk: Speech Intelligibility in Some German Sports Stadiums. In: AES-Journal, Vol. 39 (1991), No. 1/2, S. 39 - 46

Sengpiel, Eberhard: Bündelungsgrad und Bündelungsmaß der Mikrofone. Internet: <http://www.sengpielaudio.com/BuendelungsgradBuendelungsmassMikro.pdf>, 21.8.2007

Sengpiel, Eberhard: Mikrofone im Kugelschallfeld. Internet: <http://www.sengpielaudio.com/MikrofonelmSchallfeld.pdf>, 21.8.2007

Veit, Ivar: Technische Akustik. - 4. Aufl. - Würzburg : Vogel, 1988

Wahlström, Sten: The Parabolic Reflector as an Acoustical Amplifier. In: AES-Journal, Vol. 33 (1985), No. 6, S. 418 - 429

Wuttke, Jörg: Mikrofonaufsätze. - 2. Aufl. - Karlsruhe : Schoeps, 2000. Internet: <http://www.schoeps.de/D-2004/miscellaneous.html>, 8.3.2007

Zollner, Manfred ; Zwicker, Eberhard: Elektroakustik. - 3. Aufl. - Berlin (u.a.) : Springer, 1993

14 Bildverzeichnis

- Bild 1, [S. 11](#): Beispiel eines Mikrofonplans.
- Bild 2, [S. 21](#): Reflexion an der Parabel.
- Bild 3, [S. 26](#): Schalldruckpegel Publikum. (Vgl. Mapp)
- Bild 4, [S. 27](#): Spektralanalyse von Publikumsschall. (Vgl. Mapp)
- Bild 5, [S. 27](#): „Lautes“ Publikum im Stadion. (Vgl. Malmund)
- Bild 6, [S. 27](#): Frequenzspektrum menschlicher Stimme. (Vgl. Boye, AES)
- Bild 7, [S. 32](#): Spektrogramm „Schuss“.
- Bild 8, [S. 37](#): Abmessungen Spielfeld. (Vgl. FIFA, Fußballstadien)
- Bild 9, [S. 38](#): Position Hauptkamera. (Vgl. FIFA, Technische Empfehlungen)
- Bild 10, [S. 39](#): Führungskamera „Allianz Arena“.
- Bild 11, [S. 45](#): Luftabsorption. (Vgl. Boye, AES)
- Bild 12, [S. 51](#): Prinzip des Mikrofonarray. (Vgl. Brüel & Kjaer, Beamforming)
- Bild 13, [S. 57](#): „AT895“. (Vgl. Audio Technica, AT895)
- Bild 14, [S. 57](#): „AT895“ bei Olympia 2004. (Vgl. Audio Technica, Produktkatalog 2006)
- Bild 15, [S. 59](#): Bündelung durch Parabolreflektor. (Vgl. Wahlström)
- Bild 16, [S. 59](#): Verhältnis *Ila*. (Vgl. Wahlström)
- Bild 17, [S. 60](#): Verstärkung des „Parabilmikrofons“. (Vgl. Wahlström)
- Bild 18, [S. 64](#): „Parabolic microphone“ beim „American Football“. (www.parabs.com)
- Bild 19, [S. 66](#): Funktionsweise „Audioscope“. (www.sqhead.com)
- Bild 20, [S. 69](#): „Parabilmikrofon“.
- Bild 21, [S. 74](#): Messaufbau mit „Parabilmikrofon“.
- Bild 22, [S. 76](#): Richtcharakteristik „AT895“.
- Bild 23, [S. 77](#): Frequenzgänge in Terzen „AT895“, 0°, 45°, 90°, 180°.
- Bild 24, [S. 78](#): Frequenzgang „AT895“, 0°, schmalbandig.
- Bild 25, [S. 79](#): Ersatzgeräuschpegel „AT895“, CCIR.
- Bild 26, [S. 79](#): Ersatzgeräuschpegel „AT895“, IEC651.
- Bild 27, [S. 80](#): Richtcharakteristik „Parabilmikrofon“.
- Bild 28, [S. 81](#): Frequenzgänge in Terzen „Parabilmikrofon“, 0°, 45°, 90°, 180°.
- Bild 29, [S. 82](#): Frequenzgang „Parabilmikrofon“, 0°, schmalbandig.
- Bild 30, [S. 84](#): Vergleich der Bündelungsmaße von „AT895“ und „Parabilmikrofon“.
- Bild 31, [S. 88](#): Spektralanalyse „Schuss“, „Parabilmikrofon“ in 15 m Distanz.
- Bild 32, [S. 88](#): Spektralanalyse „Schuss“, „KM83i“ in 15 m Distanz.
- Bild 33, [S. 89](#): Frequenzgänge für „Parabilmikrofon“ von 0° bis 45°, Schritte von 5°.
- Bild 34, [S. 92](#): Entzerrereinstellung „Parabilmikrofon“.
- Bild 35, [S. 94](#): Prinzip der „Spectral Band Replication“. (Vgl. Kunz)