

Diplomarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

**Entwicklung eines Nachführsystems
für stark richtende Mikrofone
zur Verbesserung der Tondarstellung bei Feldsportarten**

**vorgelegt von Johann Jürgen Huber (15430)
am 09.06.2008 an der Hochschule der Medien Stuttgart**

**Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Gerhard Stoll**

Eidesstattliche Erklärung

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

Ort, Datum

Unterschrift



Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein System entwickelt, das eine verbesserte Aufnahme der Ballgeräusche beim Fußball durch die automatisierte Nachführung stark richtender Mikrofone ermöglicht.

Dazu war es zunächst notwendig, durch praktische Tests ein geeignetes Mikrofonsystem mit starker Richtwirkung auszuwählen. Nach der Betrachtung der Rahmenbedingungen wurde ein in zwei Achsen bewegliches Gerät zur mechanischen Nachführung des Mikrofons konstruiert und ein erster Prototyp gebaut. Schwerpunkte dabei waren hohe Dynamik und geringe Geräuschkentwicklung. Zur Erfassung der Ballposition auf dem Spielfeld wurden verschiedene Ball-Tracking-Verfahren recherchiert, von denen ein geeignetes System ausgewählt wurde. Die Ansteuerung der Remote-Heads durch die Ballkoordinaten erfolgt über einen Steuerungsrechner, für den eine Steuerungssoftware geschrieben wurde. Die Software umfasst auch Lösungen zu Problemen mit Systemlatenz und Schalllaufzeit. Eine Betrachtung über die Möglichkeit der Ballpositions-abhängigen Audiosignalbearbeitung schließt die Arbeit ab.

Abstract

This thesis targets on the development of a system, which provides an improved capture of the ball sounds in soccer using automated tracking of high directional microphones.

First of all it was necessary to select a suitable microphone system by practical tests. After the analysis of the basic conditions, a two-axes-device for mechanical tracking was constructed and a first prototype was built. Thereby the focus was on a high dynamic and low noise emission. To get the position of the ball in the field different ball-tracking methods were investigated and a suitable one was chosen. The remote heads are controlled by a controlling computer with the ball coordinates as input data. The created controlling software includes solutions for problems with system latency and sonic delay. The thesis finishes with an overview over the possibilities of audio signal processing controlled by the ball position.



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
1. Einführung	7
1.1 Motivation	7
1.2 Vorhandene Voruntersuchungen	8
1.3 Zielsetzung	8
2. Mikrofonauswahl	9
2.1 AT895 und „Parabolspiegelmikrofon“	9
2.2 Praktischer Vergleich in der Münchener Allianz Arena	12
2.2.1 Testaufbau	12
2.2.2 Durchführung	13
2.2.3 Nachbereitung	15
2.3 Auswahl des geeigneteren Mikrofons	15
3. Positionierung der Mikrofone	18
3.1 Bisher angedachte Positionen	18
3.2 Alternative Position	19
3.3 Vergleich und Auswahl der optimalen Position	19
3.4 Betrachtung der notwendigen Bewegungsgrade	21
4. Planung des Gesamtsystems	23
5. Ball-Tracking	25
5.1 Führungskamera	27



5.2	Tracab	29
5.3	Weitere Systeme	30
6.	Konstruktion des Remote Heads	31
6.1	Anforderungen	31
6.2	Prinzipieller Aufbau	32
6.3	Auswahl geeigneter Motoren.....	34
6.3.1	Berechnung der maximalen Geschwindigkeit und Beschleunigung	34
6.3.2	Berechnung der maximal aufzubringenden Drehmomente	35
6.3.3	Auswahl eines geeigneten Motors	40
6.4	Konstruktion	42
6.4.1	Ansatz	42
6.4.2	Grundkonstruktion	43
6.4.3	Antrieb Drehachse	45
6.4.4	Antrieb Schwenkachse	46
6.4.5	Mikrofonhalterung	48
6.4.6	Gehäuse und Stativbefestigung.....	49
6.5	Aktuelle Geräuschemission	51
6.6	Maßnahmen zur Geräuschkürzung	53
6.6.1	Erregerkräfte	54
6.6.2	Körperschallmaß.....	55
6.6.3	Abstrahlmaß	56
6.7	Kalibrierung	57
7.	Signal- und Versorgungsleitungen.....	59
7.1	Steuersignale	59



7.2	Audiosignale	59
7.3	Stromversorgung	60
8.	Software	60
8.1	Wahl der Programmiersprache	60
8.2	Konzeption.....	62
8.2.1	Aufgaben.....	62
8.2.2	Überblick.....	62
8.2.3	Hauptmodul mit graphischer Benutzeroberfläche	64
8.2.4	Eingangsmodul „Maussteuerung“	66
8.2.5	Eingangsmodul „Head Tracker“	67
8.2.6	Eingangsmodul „TRACAB“	68
8.2.7	Eingangsmodul „Datei“	68
8.2.8	Modul Zielkoordinatenverwaltung.....	68
8.2.9	Modul RS485-Kommunikation	70
8.2.10	Modul Remote-Head	70
8.2.11	Modul Datei-Ausgabe	72
8.2.12	Aktueller Stand der praktischen Umsetzung.....	72
9.	Audiosignalbearbeitung	72
10.	Schlussbetrachtung	74
10.1	Aktueller Projektstand und Ausblick	74
10.2	kritische Reflexion	75
11.	Literaturverzeichnis	76
A.	Anhang.....	77



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - 0°Frequenzgang "AT895"	10
Abbildung 2 - 0°-Frequenzgang "Parabol / KM83i"	10
Abbildung 3 - Parabolspiegel und Mikrofon mit Kugelcharakteristik	10
Abbildung 4 - Parabolspiegel und Mikrofon mit Nierencharakteristik	10
Abbildung 5 - Richtcharakteristik Parabolspiegel mit Kugelmikrofon	11
Abbildung 6 - Richtcharakteristik Parabolspiegel mit Nierenmikrofon	11
Abbildung 7 - Testaufbau in der Allianz Arena	13
Abbildung 8 - Vergleich verschiedener Mikrofonstandorte	20
Abbildung 9 - vertikales Schwenken mit Begrenzung	22
Abbildung 10 - System Overview	23
Abbildung 11 - Fallstudie bei den Testaufnahmen in der Allianz Arena	28
Abbildung 12 - erste Konstruktionskizze	33
Abbildung 13 - CAD-Ansicht der Grundkonstruktion	44
Abbildung 14 - CAD-Ansicht der Dreheinheit	45
Abbildung 15 - CAD-Ansicht der Schwenkeinheit	46
Abbildung 16 - Aufbau der Antriebseinheiten des Remote-Heads	47
Abbildung 17 - CAD-Ansicht der Mikrofonhalterung	48
Abbildung 18 - Remote Head Prototyp auf Stativ	49
Abbildung 19 - CAD-Ansicht der Stativbefestigung	50
Abbildung 20- Messung der Geräuschemission des Remote-Heads	52
Abbildung 21 - mögliche Verdrehung des Remote Head	57
Abbildung 22 - Aufbau der Steuersoftware	63
Abbildung 23 - Startbildschirm der Benutzeroberfläche	64
Abbildung 24 - Fenster für das Modul zur Maussteuerung	66



1. Einführung

1.1 Motivation

Seit dem Beginn der Fernsehen-Ära in den 50er Jahren hat sich die Technik grundlegend gewandelt. Die Einführung des Farbfernsehens, der Wandel von der Analog- zur Digitaltechnik und in jüngster Zeit die Wende zu HDTV und 5.1-Ton im Wohnzimmer sind Meilensteine, die die Qualität der Übertragung von Bild und Ton kontinuierlich verbessert haben.

Auf Produktionsseite muss dieser Entwicklung Rechnung getragen werden. So ist es heute neben einer hochwertigen inhaltlichen Programmgestaltung sehr wichtig, mit modernen technischen Möglichkeiten eine erstklassige Bild- und Tonqualität zu produzieren, um damit die neuen technischen Gegebenheiten auf Empfängerseite auszureizen. Nur mit qualitativ hochwertigen Inhalten wird für den Zuschauer HDTV und 5.1-Ton zum Erlebnis.

Gerade bei Sportproduktionen werden bereits viele technische Neuerungen benutzt, um - den Zuschauer stärker ins Geschehen mit einzubinden. Seien es Cockpit-Kameras bei Autorennen, die den Zuschauer zum Beifahrer machen, oder Seilkameras, die den Zuschauer neben einem Skispringer herfliegen lassen. Bei Fußballübertragungen verschaffen beispielsweise Kamerakräne hinter und kleine Kameras im Tor neue Blickwinkel.

Auch auf der auditiven Seite wird versucht, die Zuschauer stärker an die Ereignisse zu rücken. Dabei ist der frühere „Fernseh-Begleitton“ auf dem Weg, als eigenständige Komponente das Bilderlebnis zu erweitern und realistischer zu machen. Inzwischen werden bei großen Sportveranstaltungen wie der Olympiade Mikrofone an allen möglichen Plätzen installiert, sei es an den Hindernissen beim Springreiten, unter der Magnesia-Schale beim Reck-Turnen oder vergraben in der Sandgrube beim Weitsprung. Die sportartspezifischen Geräusche gehören inzwischen zum Fernseh-Erlebnis dazu.

Beim Fußball ist von den spezifischen Geräuschen bislang aber wenig zu hören. Der Fernseh-Zuschauer hat sich daran gewöhnt, akustisch auf den Zuschauerrängen zwischen den Fans eingebettet zu sein, obwohl er optisch viel näher am Spielgeschehen dran ist. Hier würde eine passende Anreicherung der Tonmischung mit den fußballspezifischen Geräuschen den



Eindruck verstärken, direkt auf dem Feld dabei zu sein. Die Bereitstellung dieser sportartspezifischen Geräusche ist Ziel dieses Projekts.

1.2 Vorhandene Voruntersuchungen

Als Startpunkt dieser Arbeit dienen die Voruntersuchungen von Felix Holderer¹, der in seiner Diplomarbeit die theoretischen Grundlagen zu einer verbesserten Tondarstellung im Fußballstadion erarbeitet hat. Nach einem Überblick über die akustischen Grundlagen hat er die akustischen Verhältnisse im Stadion theoretisch betrachtet und entsprechend den Ergebnissen nach Mikrofonen mit hoher Richtwirkung gesucht. Zwei erfolgversprechende Mikrofonsysteme wurden mit dem Audio Technica AT895 und einem „Parabilmikrofon“ gefunden, die daraufhin näher untersucht und vermessen wurden. Nach der Entscheidung für das „Parabilmikrofon“ folgten Testaufnahmen von Ballgeräuschen ohne Publikum und der Versuch einer Frequenzgangkompensation anhand des aufgenommenen Testmaterials. Durch die hohe Richtwirkung des Mikrofons wurde die Notwendigkeit einer Nachführung hergeleitet, die anhand der Bewegungsdaten der Führungskamera automatisiert erfolgen sollte. Für zwei ausgesuchte Mikrofonstandorte wurde die notwendige Winkelgeschwindigkeit eines Stellmotors ansatzweise berechnet. Im Verlauf dieser Arbeit werden diese theoretischen Voruntersuchungen immer wieder aufgegriffen und teilweise als Basis für weitere Auslegungen verwendet.

1.3 Zielsetzung

Ziel ist es, ein System zu entwickeln, das die getrennte Aufnahme der spezifischen Feldgeräusche beim Fußball erlaubt. Dies entspricht im Wesentlichen den Ballgeräuschen, weshalb diese Begriffe im Folgenden synonym verwendet werden. Der Störschall des Publikums soll so weit wie möglich ausgeblendet werden. Diese Vorgabe soll durch den Einsatz eines stark richtenden Mikrofon-Systems umgesetzt werden, das automatisch dem Ball nachgeschwenkt wird.

Das System soll bei Fernsehproduktionen eingesetzt werden und sich deshalb gut in den gängigen Produktionsablauf integrieren lassen. Dazu ist es wichtig, dass das System von

¹ vgl. Holderer, F. (2007)



möglichst wenig Personal schnell Auf- und Abgebaut werden kann und eine eventuelle Kalibrierung mit möglichst wenig Aufwand durchzuführen ist. Der Ablauf während der Produktion sollte idealerweise kein manuelles Eingreifen erfordern. Oberste Priorität hat vor allem auch die Zuverlässigkeit eines solchen Systems. Sowohl ein Totalausfall als auch eingeschränkte Funktionsfähigkeit während der Produktion sollten unter allen Umständen vermieden werden. Im Hinblick auf eine Positionierung im Markt ist es natürlich auch essentiell, die Gesamtkosten so niedrig wie möglich zu halten.

Angedacht ist, ein solches System später auch für andere Sportarten einzusetzen. Deshalb sollte bereits in der Konstruktionsphase darauf geachtet werden, dass eine spätere Adaption so einfach wie möglich umzusetzen ist.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die komplette Planung des Systems, der Aufbau eines ersten Prototypen und wenn möglich erste Tests durchgeführt werden.

2. Mikrofonauswahl

2.1 AT895 und „Parabolspiegelmikrofon“

Bei den Voruntersuchungen von Felix Holderer wurden nach einem Marktüberblick zwei Mikrofone ausgewählt, die eine für das Vorhaben notwendige enge Richtcharakteristik aufweisen: das Audio Technica AT895 und ein Parabolreflektor mit einem angebrachtem Kugelmikrofon KM83i von Neumann. Mithilfe eines MLS-Messverfahrens² wurde im reflexionsarmen Raum (RaR) des IRT für beide Mikrofone der Frequenzgang und die Richtcharakteristik bestimmt. Das AT895 wurde zudem auf sein Rauschverhalten hin untersucht.

Vergleicht man die gemessenen 0°-Frequenzgänge der Mikrofone, so zeigt sich beim „Parabolspiegelmikrofon“ durch die akustische Verstärkung eine große Empfindlichkeit für hohe Frequenzen, für tiefe Frequenzen fehlt dieser Effekt, hier bleibt der Parabolspiegel „durchsichtig“. Der erwartete Klangeindruck ist also sehr höhenbetont und damit relativ

² vgl. Holderer, F. (2007), S. 75



präsent. Das AT895 weist „on-axis“ einen relativ konstanten Frequenzverlauf auf, eignet sich also besser, die natürliche Klangcharakteristik zu erhalten.

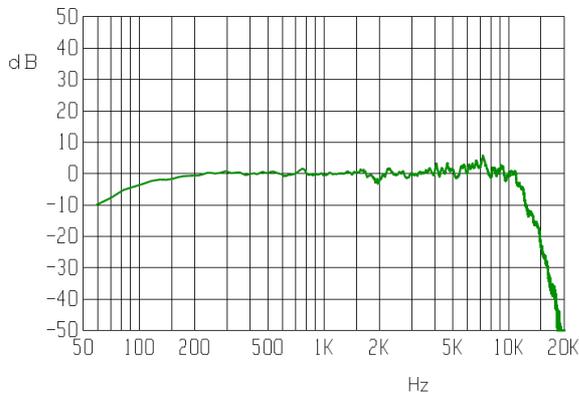


Abbildung 1 - 0°-Frequenzgang "AT895"

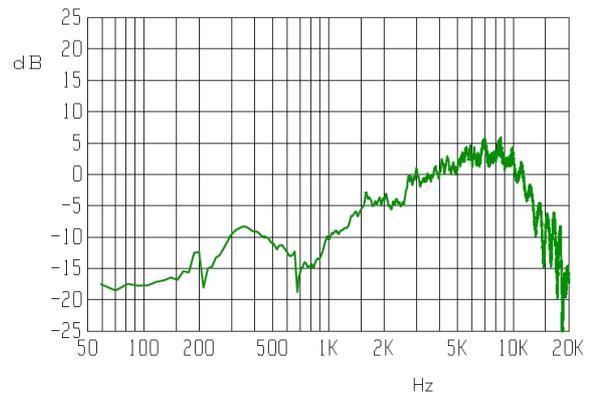


Abbildung 2 - 0°-Frequenzgang "Parabol / KM83i"

Betrachtet man die gemessenen Richtdiagramme, so hat das „Parabolspiegelmikrofon“ eine viel stärker ausgeprägte Richtwirkung. Diese entsteht aus einer Kombination von Verstärkung der direkt von vorne einfallenden Schallwellen durch die Bündelungseigenschaft des Reflektors und einer Dämpfung der von hinten kommenden Schallwellen. Beide Effekte treten nur für Frequenzen auf, deren Wellenlänge kleiner als der Spiegeldurchmesser ist.

Da zunächst die Richtwirkung als der kritischste Punkt bei der gezielten Hervorhebung der Fußballgeräusche schien, wurde der Versuch unternommen, die Richtwirkung weiter zu verbessern. Hierzu wurde das Kugelmikrofon, ein Neumann KM83i durch ein in den Spiegel gerichtetes Nierenmikrofon, ein Schoeps CCM4 ersetzt. So nimmt die Kapsel nur noch die

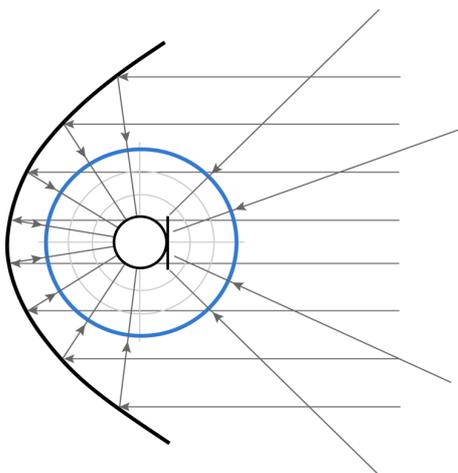


Abbildung 3 - Parabolspiegel und Mikrofon mit Kugelcharakteristik

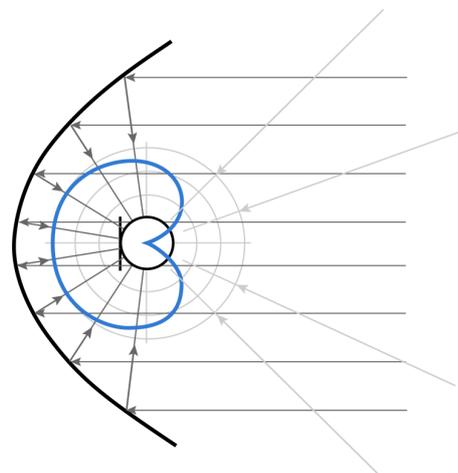


Abbildung 4 - Parabolspiegel und Mikrofon mit Nierencharakteristik



vom Spiegel in den Brennpunkt reflektierten Wellen auf, für rückwärtigen und seitlichen Schall (aus Sicht der Kapsel) ist die Empfindlichkeit niedriger, wie in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt ist.

Wie in den Abbildungen 5 und 6 zu sehen ist, ergaben die Messungen im RaR durch diesen Umbau eine noch wesentlich ausgeprägtere Richtcharakteristik, besonders für hohe Frequenzen. Der Preis für das erhöhte Bündelungsmaß ist eine verminderte Empfindlichkeit bei tiefen Frequenzen, da diese vom Spiegel nicht reflektiert werden und die rückwärtige Empfindlichkeit bei Mikrofonen mit Nierencharakteristik niedrig ist. Dies ist problematisch, da eben diese tiefen Frequenzen wichtig sind für einen natürlichen, satten Ballklang. Ein direkter Vergleich beider Mikrofone sollte bei den geplanten Mikrofontests in der Allianz Arena durchgeführt werden.

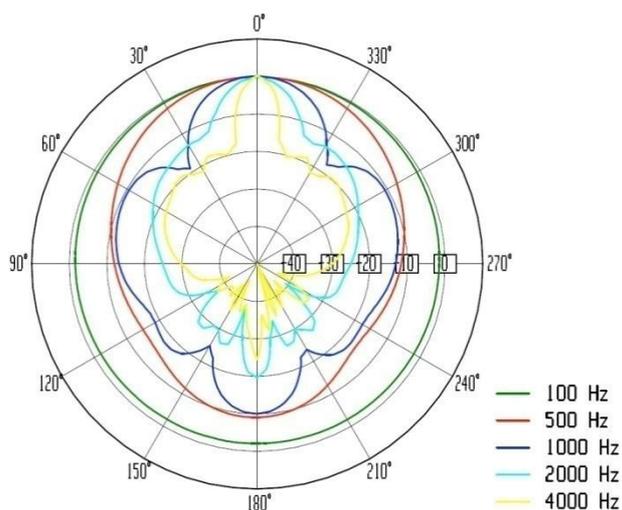


Abbildung 5 - Richtcharakteristik Parabolspiegel mit Kugelmikrofon

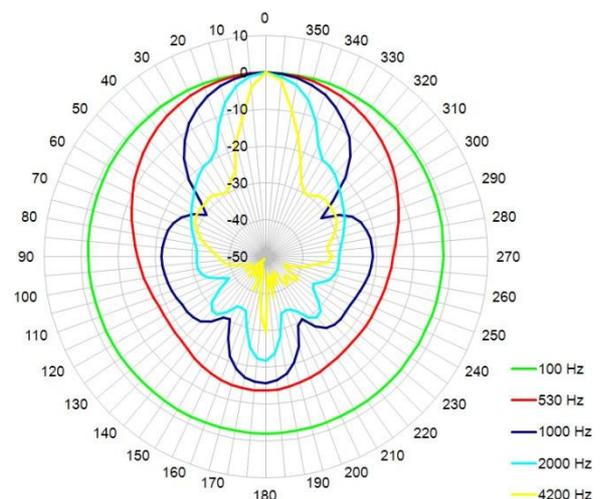


Abbildung 6 - Richtcharakteristik Parabolspiegel mit Nierenmikrofon

Bei der Betrachtung des von Holderer erstellten Richtdiagramms für das AT895 fällt auf, dass das Diagramm eine starke Asymmetrie aufweist, obwohl das Mikrofon symmetrisch aufgebaut ist. Auf der Suche nach einer Erklärung fiel im Datenblatt des AT895 eine Stelle auf, in der auf die „adaptive“ Funktion des Algorithmus eingegangen wird: *“These signals are processed in the Control Pack by both analog and digital means to provide continuously-adapting rejection of off-axis sounds. This means that as the off-axis soundscape changes (either in intensity or directionality) the microphone system compensates for those*



changes."³. Eine mögliche Interpretation dieser Aussage wäre, dass der Algorithmus das ankommende Signal analysiert und die Signalverarbeitung anpasst, auf welche Art auch immer. Möglicherweise wird dabei auch das zeitlich vorhergehende Signal mit einbezogen. Da bei der Messung das Mikrofon kontinuierlich in einer Richtung um 360° gedreht wird, könnte ein solches Verhalten die Auswirkungen auf die Symmetrie des Diagramms bedingen.

Eine weitere Aussage wurde direkt bei den Leistungsdaten gefunden: *"Due to the adaptive nature of its digital processing, AT895 performance in actual field conditions will vary with the environment encountered."*⁴. Da der Algorithmus wohl auf den Einsatz unter realen Bedingungen optimiert ist, liegt die Vermutung nahe, dass die vorherrschenden Laborbedingungen im RaR der Grund für das schlechte Abschneiden bei den Messungen sind. Der bereits erfolgreiche Einsatz bei Sportproduktionen unterstützt diese Vermutung.

Auf jeden Fall wird klar, dass die Entscheidung für ein Mikrofon nicht allein aufgrund der Messungen fallen kann. Es sind praktische Tests notwendig.

2.2 Praktischer Vergleich in der Münchener Allianz Arena

Deshalb war es zunächst die Aufgabe, geeignete Einsatzbedingungen für einen Test zu finden. Eine gute Gelegenheit bot ein Freundschaftsspiel des FC Bayern gegen die Olympia-Auswahl von China in der Allianz-Arena in München. Das Spiel fand am 12.01.2008 statt und wurde vom Bayerischen Rundfunk (BR) in Stereo produziert. Es wurde sowohl vom BR als auch von einem chinesischen Sender übertragen. Das Stadion war mit 55.000 Zuschauern relativ gut gefüllt und bot damit den idealen Rahmen für die Tests.

2.2.1 Testaufbau

Zunächst musste ein Testaufbau erstellt werden und das Vorgehen geplant werden. Für beide Mikrofone wurde dazu von der Werkstatt eine spezielle Halterung angefertigt, mit Hilfe derer die Mikrofone in einem einstellbaren vertikalen Winkel am Stativ befestigt werden konnten. Ein Neumann KM83i mit Kugelcharakteristik wurde zusätzlich oben

³ Audio Technica (2008), S. 5

⁴ Audio Technica (2008), S. 2



angebracht. Das Stativ war bereits am IRT vorhanden und reichte bis in eine Höhe von ca. 8m. Der Parabolspiegel war in einer Höhe von 7,10m montiert, das AT895 in einer Höhe von 7,50m. Da erwartet wurde, dass der Parabolspiegel empfindlich auf Wind reagiert, wurde auf dessen Rand als Windschutz ein geschlitzter poröser Schaumstoff geklemmt.

Unter der Voraussetzung, dass das unterste Segment nicht fixiert wurde, ließ sich das komplette Stativ drehen und damit der horizontale Winkel der Mikrofone nachführen. Zur besseren Nachführung wurde eine Querstrebe aus Holz an das Stativ geklemmt. Ein langes

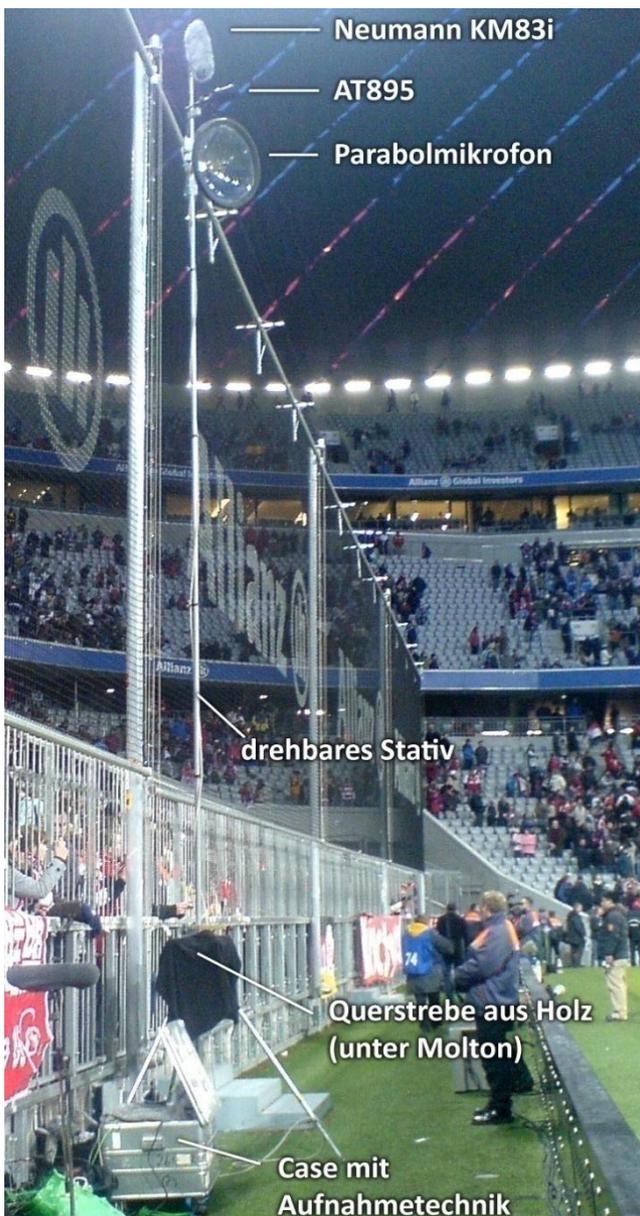


Abbildung 7 - Testaufbau in der Allianz Arena

Lineal, das in der gleichen Richtung wie die Mikrofone ausgerichtet war, half beim Anvisieren des Balls.

Zur Aufnahme wurde ein Sony MPEG IMX Recorder verwendet, da dieser in der Lage war, 8 Audiokanäle sowie das Videosignal aufzuzeichnen. Als Vorverstärker und Wandler wurde das Motu 896HD Interface verwendet. Ein kleiner LCD-Kontrollmonitor wurde für die Überwachung des Videosignals verwendet. Alle Geräte wurden in einem fahrbaren Case untergebracht und bereits fertig verkabelt. Dadurch wurde die Aufbauzeit im Stadion verkürzt.

2.2.2 Durchführung

Primäres Ziel der Untersuchungen war es, die beiden Mikrofonsysteme Audio Technica AT895 und Parabolspiegel mit KM83i bzw. CCM4 bezüglich ihrer Eignung zur Aufnahme von Feldgeräuschen zu vergleichen.



Zusätzlich sollten die Auswirkungen verschiedener Höhen der Mikrofone untersucht und Informationen über den Einfluss des Direktschalls von der gegenüberliegenden Publikumsseite gewonnen werden.

Zu diesem Zweck sollte während des Spiels zwischen verschiedenen Testkonfigurationen gewechselt werden. Der Parabolspiegel im Wechsel mit KM83i und CCM4, mit und ohne Windjammer auf den Mikrofonen, das Stativ in 8m und in 2m Höhe und unterschiedliche vertikale Winkel zur Ausrichtung von AT895 und Parabolspiegel.

Nachdem der Produktionsleiter jedoch kurz vor dem Spiel mitteilte, dass sich während des Spiels nur eine Person hinter dem Tor aufhalten darf, war ein Umbau während des Spiels nicht mehr möglich. Somit konnte die Testkonfiguration nur während der Halbzeit gewechselt werden. Es mussten einige Testoptionen wegfallen.

So wurde während der ersten Halbzeit der vertikale Winkel auf 25° gegenüber der Waagrechteten eingestellt und alle Mikrofone erhielten einen Windschutz. Da beim Kontrollhören auffiel, dass der Klang des Parabolspiegelmikrofons sehr dumpf war, wurden in der Halbzeit die Windjammer abgenommen und die Winkel der Mikrofone auf 10° eingestellt. Damit lag während der ersten Halbzeit das Publikum außerhalb der Haupteinfallrichtung der Mikrofone, während der zweiten Halbzeit innerhalb. Es wurden außerdem drei zusätzliche Mikrofone aufgezeichnet, jeweils eins an den beiden Ecken und eins direkt hinter dem Tor. Die Mikrofone befanden sich ca. 1,5m über dem Boden.

Das Bildsignal vom Ü-Wagen konnte nicht mit aufgezeichnet werden. Es stellte sich heraus, dass für ein analoges Signal die Kabellänge zu groß und damit das Signal zu schwach war. Ein digitales Signal konnte auch nicht verwendet werden, da das Motu-Interface für den Testaufbau das Clock-Signal vorgab. Da das Videosignal seine eigene Zeit-Referenz hatte, konnten die Signale nicht synchronisiert werden. Eine Lösung des Problems war in der Kürze der Zeit nicht möglich, so dass das Bild nicht aufgezeichnet werden konnte.

Während des Spiels wurde versucht, die Mikrofone durch Drehen des Stativs ständig dem Ball nachzuführen. Durch die sehr dynamischen Ballbewegungen war dies manchmal nur sehr schwer möglich. So kam es oft vor, dass das Ziel kurzzeitig verloren ging oder die Nachführung zumindest ungenau war. Der Hauptunterschied zu einem Operator, der nur ein Mikrofon in der Hand hält, ist natürlich, dass ein komplettes Stativ mit mehreren Mikrofonen



bewegt werden musste. Trotzdem liegt aufgrund dieser Erfahrung die Vermutung nahe, dass es auch für Operator oft sehr schwer sein muss, immer „am Ball“ zu bleiben. An dieser Stelle ist eine mechanische Nachführung möglicherweise wesentlich genauer.

2.2.3 Nachbereitung

Bei den Aufnahmen wurde der Vorverstärker für jeden Kanal so eingestellt, dass das entsprechende Mikrofon einen möglichst großen Dynamikbereich ausnutzt, ohne zu übersteuern. Damit quantitative Aussagen über die vorherrschenden Schalldruckpegel an den Mikrofonpositionen möglich werden, wurde im Nachhinein im RaR des IRT der Recorder mit Vorverstärker und Mikrofonen nochmals aufgebaut. Die Reglereinstellungen waren die gleichen wie im Stadion. Jedes Mikrofon wurde mit einem definierten Schallpegel von 80dB(A) in einer definierten Entfernung von 1m beschallt und die Signale aufgezeichnet. Damit war ein Referenzsignal vorhanden.

Die Audiosignale wurden im Anschluss auf eine Digitale Audio Workstation (DAW) überspielt und ein Nuendo-Projekt angelegt. Audio und Videospur des Mitschnitts vom BR wurden ebenfalls auf die DAW überspielt und zu den eigenen Aufnahmen synchronisiert. Somit konnten nun alle aufgezeichneten Signale sowie der Fernseh-Ton analysiert werden.

Da bei den Aufnahmen am AT895 immer der mitgelieferte Zeppelin-Windschutz montiert war, der Klang ohne Windschutz aber auch von Interesse war, wurde vor dem IRT noch eine kurze Testsequenz aufgenommen. Die Aufnahmen mit und ohne Zeppelin brachten gleichklingende Ergebnisse. Der Einfluss des Windschutzes ist also vernachlässigbar.

2.3 Auswahl des geeigneteren Mikrofons

Bei der Auswertung der Aufnahmen wurde erkennbar, dass beide getesteten Mikrofone den Direktschall des Balls aus dem diffusen Störgeräusch des Publikums recht gut herausheben. Der Parabolspiegel dämpft die Störgeräusche dabei etwas besser, der Klangeindruck ist aber sehr höhenbetont. Zwar setzen sich die Ballgeräusche dadurch im Mix mit dem Stereo-Ton des BR gut durch und sind sehr präsent, allerdings geht die Klangcharakteristik etwas verloren. Statt eines satten „Wumms“ erinnert die Klangempfindung tendenziell eher an einen Golfball.



Das Signal des AT895 bietet eine natürlichere Übertragung der Charakteristik, allerdings mit etwas schlechterer Störgeräuschkämpfung. Auffallend ist, dass bei Spielaktionen im Mittelfeld der Ball manchmal nur noch mit dem AT895 wahrnehmbar ist. Dieser Effekt ist möglicherweise auf die Luftdissipation zurückzuführen, durch die gerade die Frequenzen verloren gehen, die vom „Parabolkmikrofon“ bevorzugt aufgenommen werden.

Aufgrund der spektralen Verteilung des vorliegenden Signals bietet sich eine Filterung zur weiteren Trennung vom Störschall an. Wie bei Holderer gemessen, zeigt die Spektralverteilung eines Ball-Kicks ein Maximum bei ca. 100 Hz. Auch in den hohen Frequenzen befindet sich ein Maximum bei ca. 6 kHz. Der vom Publikum verursachte Störschall hat den größten Schalldruckpegel im Bereich zwischen 250 Hz und ca. 4 kHz. Wird dieser Bereich breitbandig abgesenkt und gleichzeitig die für den Ball-Kick typischen Frequenzen leicht angehoben, ergibt sich eine stark verbesserte Trennung der Geräusche. Dies funktioniert beim AT895 sehr gut. Der Klang des Balles wirkt zwar zunächst etwas unnatürlich betont, beim Zumischen zur Publikums-Atmo ergibt sich aber ein stimmiges Gesamtbild, bei dem der Ball deutlich hörbar und als solcher erkennbar ist.

Beim „Parabolkmikrofon“ verläuft eine Filterung nicht ganz so problemlos. Das Publikums-Geräusch kann zwar ebenso abgesenkt werden, problematisch sind aber nach wie vor die tiefen Frequenzen. Hier kann die für ein volles Ballgeräusch dringend notwendige Anhebung nicht so stark erfolgen. Es würde hauptsächlich Störschall verstärkt werden, der zu einem tiefen „grummeligen“ Geräuschteppich führt. Die hohen Frequenzen um 7kHz müssen bei diesem Mikrontyp breitbandig abgesenkt werden, um die Härte des Klangs etwas zu mildern.

Ausgewählte Beispiele der Aufnahmen sind als Quicktime-Datei auf der beigefügten CD enthalten. In den Beispielen wird jeweils der reine Sendeton des BR mit einer Mischung aus Sendeton und AT895 verglichen. Zusätzlich sind im ersten Beispiel die Roh-Signale von AT895 und Parabolspiegel, sowie gefilterte Signale beider Mikrofone zu hören.

Durch die starken Einschränkungen bei den Testaufnahmen war es nicht mehr möglich, neben dem Schoeps CCM4 auch das Neumann KM83i im Parabolspiegel anzubringen und zu testen. Somit kann nur theoretisch davon ausgegangen werden, dass bei einem Wechsel von Niere zu Kugel die Publikumsdämpfung etwas schwächer ausgefallen wäre, dafür aber die Übertragung der tiefen Frequenzen etwas kräftiger gewesen wäre. Aufgrund der physika-



lischen Gegebenheiten des Parabolspiegels und mit Hinweis auf die Aufnahmen von Felix Holderer ist aber ersichtlich, dass der Klang nach wie vor sehr höhenbetont gewesen wäre. Damit gibt die Versuchsanordnung auf jeden Fall zumindest die Tendenz des mit einem Kugelmikrofon zu erwartenden Ergebnisses wieder. Das AT895 würde auch im Vergleich mit einem Parabolspiegel mit Kugelmikrofon weiterhin den natürlicheren Klangeindruck vermitteln.

Abgesehen von den akustischen Eigenschaften gibt es auch noch andere wichtige Kriterien, die für eine Auswahl von Bedeutung sind. Zum einen sind dies die physikalischen Faktoren. Der Parabolspiegel ist nicht nur größer und schwerer als das AT895, es hat auch einen sehr ungünstigen Schwerpunkt, der eine recht große mechanische Aufhängung notwendig machen würde. Durch die Größe besteht auch eine nicht zu unterschätzende potentielle Sichtbeeinträchtigung für manche Zuschauer. Auch ist der Parabolspiegel aufgrund seiner großen Fläche recht anfällig für Windgeräusche. Dies kann man sehr gut verdeutlichen, indem man über den Rand des Spiegels bläst.

Im Gegensatz dazu ist das AT895 kleiner, leichter und handlicher. Die interne Signalverarbeitung eliminiert laut Datenblatt mögliche Windgeräusche sehr gut. Nachteilig ist hier der hohe Ersatzgeräuschpegel, der jedoch vom ständig vorhandenen Störschall im Stadion sehr gut überdeckt wird. Lediglich bei einer unvorsichtigen stärkeren Anhebung der Höhen kann sich dieses Eigenrauschen wieder bemerkbar machen. Das AT895 ist inzwischen nicht mehr auf dem Markt, was natürlich ein weiterer Kritikpunkt ist. Laut Auskunft von Audio Technica wurde das Produkt in Europa vom Markt genommen, weil es nicht der RoHS-Richtlinie entspricht. Inzwischen ist das Mikrofon auch weltweit nicht mehr verfügbar. Jedoch ist bereits ein Nachfolge-Modell in Planung, das 7 statt bisher 5 Kapseln haben soll und durch einen wesentlich besseren DSP-Chip sowohl das Eigenrauschen verringern, als auch neue Funktionen beinhalten soll. Die Richtwirkung soll noch ausgeprägter sein und elektrisch umgeschaltet werden können.

Aufgrund der Hörvergleiche und der vorgebrachten Vor- und Nachteile der einzelnen Mikrofone wird für das weitere Vorgehen das Audio Technica AT895 ausgewählt. Obwohl das Mikrofon nicht mehr und der Nachfolger noch nicht verfügbar ist, hat Audio Technica inzwischen seine Unterstützung für dieses Projekt zugesagt.



3. Positionierung der Mikrofone

3.1 Bisher angedachte Positionen

Genauso wichtig wie das passende Mikrofon ist eine gute Positionierung. In seinen Voruntersuchungen hat sich Felix Holderer bereits ausführlich mit dieser Thematik beschäftigt und zwei Optionen zur Positionierung gegeben: auf der Plattform für die Führungskamera und an der Seitenlinie zwischen Mittellinie und Torlinie.

Die Position bei der Führungskamera wurde im Hinblick auf viele Faktoren als besser geeignet eingestuft. So wäre das System komplett außerhalb des Sichtfeldes von Spielern und Zuschauern und würde somit jegliche Verwirrung vermeiden. Auch können sich keine Hindernisse zwischen Mikrofon und anvisiertem Schallereignis befinden, da die Position der Führungskamera erhöht ist. Die Schallpegeldifferenzen der an unterschiedlichen Orten auftretenden Schallereignisse wären durch den großen Abstand etwas geringer und die Wettereinflüsse auf das Mikrofon wären an dieser geschützten Position minimiert.

Akustisch gesehen ist diese Position durch den großen Abstand zur Schallquelle jedoch nachteilig, da die Pegeldifferenz zwischen Nutz- und Störschall groß zugunsten des Störschalls und die Schalllaufzeiten für den Nutzsoll sehr hoch wären. Aus diesem Grund wurde auch die zweite, „akustisch ideale“ Position an der Seitenlinie betrachtet. Hier sind die Entfernungen geringer, jedoch entstehen andere mögliche Probleme. So könnten sich Hindernisse zwischen dem Mikrofon und dem Ort des Schallereignisses, wie beispielsweise schreiende Spieler befinden. Ein bei Holderer bisher nicht angesprochenes, aber dennoch sehr störendes Problem wäre der Publikumsschall auf der gegenüberliegenden Seite. Das Publikum würde sich ständig in der Haupteinfallrichtung des Mikrofons befinden, in einer Entfernung von nur ca. 80m und damit in manchen Situationen nicht sehr viel weiter weg als der Ball. Auch die Plazamedia GmbH hat nach Aussage des Leiters der Tontechnik, Johannes Hegele, bereits Tests mit Parabol-Mikrofonen gemacht, jedoch seien die Ergebnisse nicht zufriedenstellend gewesen, „ [...] da zuviel Atmo von den Zuschauern auf der anderen Spielfeldseite mit eingefangen wurde“⁵. Ein Eindruck des Einflusses von Publikumsschall in

⁵ E-Mail von Johannes Hegele an Felix Holderer vom 12.04.2007



der Haupteinfallrichtung des Mikrofons entstand auch bei den Testaufnahmen in der Allianz Arena. Da der vertikale Winkel der Mikrofone fixiert war, führte ein Schwenk zur Seite dazu, dass das Publikum in den Haupteinfallsbereich kam. Dies führte zu einer wesentlichen Erhöhung des Störgeräuschpegels.

Da beide Standorte beträchtliche Nachteile haben, soll im nächsten Abschnitt eine alternative Position vorgestellt werden.

3.2 Alternative Position

Die optimale Position muss also einen möglichst geringen Abstand zum Spielfeld aufweisen, muss ein Vorhandensein des Publikums in der Haupteinfallrichtung vermeiden und eine direkte Sichtverbindung zum Schallereignis gewährleisten. Außerdem sollten die Zuschauer und Spieler so wenig wie möglich abgelenkt werden.

Diese Vorgaben werden erfüllt, wenn das Mikrofon hoch hinter jedem Tor platziert wird. Etwa die Hälfte der Bundesligastadien besitzt ein Ballfangnetz hinter dem Tor, mit einer Höhe von meist 6-8 Metern. Sehr vorteilhaft wäre eine Befestigung an den Pfosten, an denen das Netz aufgezogen ist. Bei einer Befestigung hinter dem Netz wäre das Mikrofon auch gleich vor dem Ball geschützt. In Stadien, in denen ein solches Netz nicht vorhanden ist, müsste ein entsprechend hohes Stativ aufgebaut werden. Auf einen Schutz des Mikrofons müsste in diesem Fall verzichtet werden. Die Position hinter dem Tor hat sich auch bereits als Standort für Kamerakräne etabliert, die wesentlich auffälliger sind und viel mehr Raum einnehmen. Von Seiten der Sichtbeeinträchtigung sollte das Mikrofon also, besonders auch wegen der großen Höhe, kein Problem darstellen.

3.3 Vergleich und Auswahl der optimalen Position

In der folgenden Grafik sind die drei diskutierten Positionen zur Veranschaulichung mit den entsprechenden maximalen Entfernungen eingezeichnet:



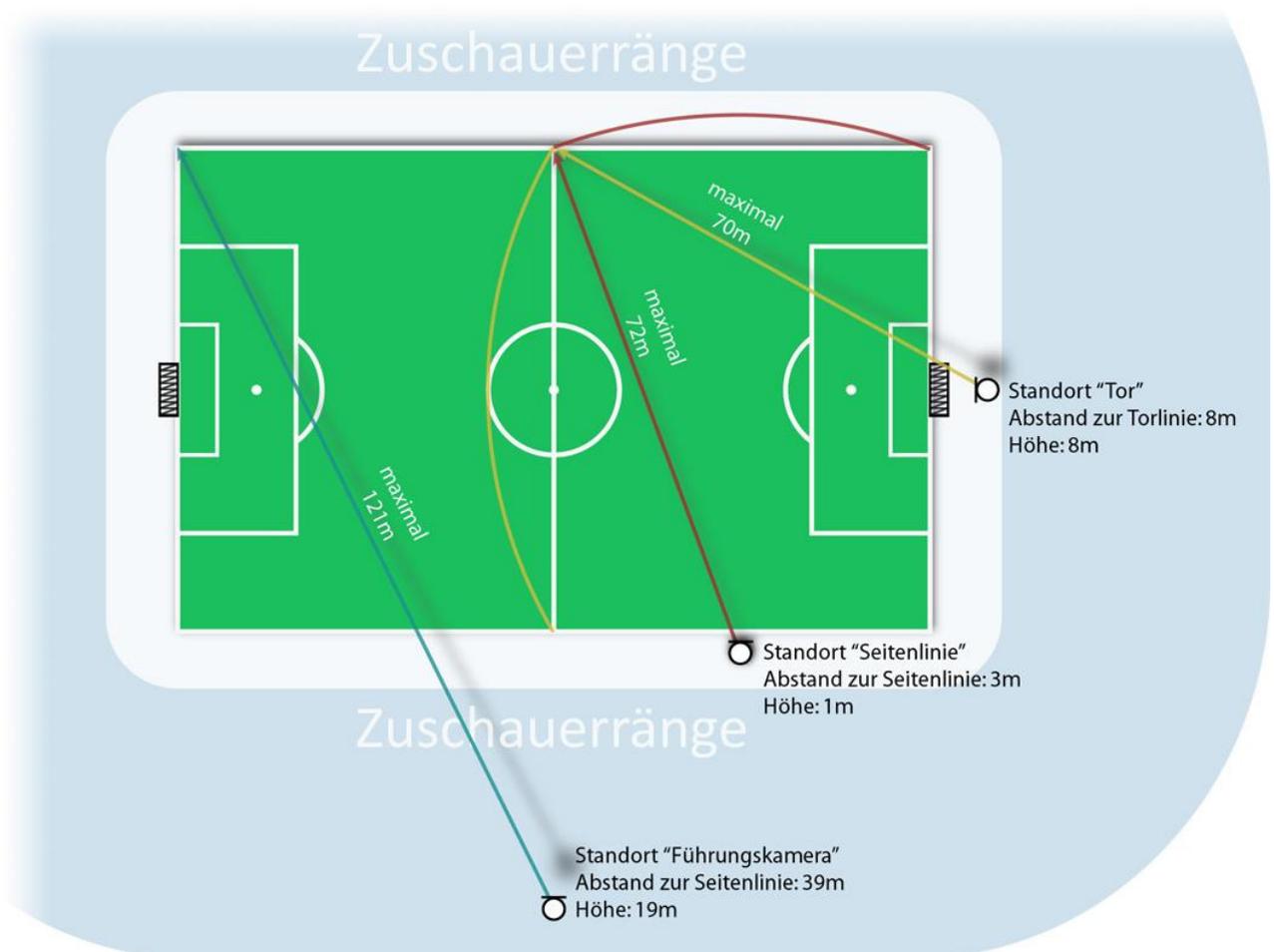


Abbildung 8 - Vergleich verschiedener Mikrofonstandorte

Trotz der aufgeführten Vorteile kommt der Mikrofon-Standort „Führungskamera“ nicht weiter in Frage. Die Entfernungen zu den möglichen Schallereignissen sind so groß, dass ein qualitativ zufriedenstellendes Ergebnis mit den zur Verfügung stehenden Mikrofonsystemen sehr unrealistisch wäre. Wie bei Holderer beschrieben, sind die Nutzschnallpegel im Vergleich zu den Störschnallpegeln sehr gering. Desweiteren würden auch die hohen Schalllaufzeiten von 125 bis 350ms (bei 20°C) nicht nur einen sichtbaren, sondern sogar einen störenden Versatz von Bild und Ton bedeuten.

Aus akustischer Sicht ist die Position an der Seitenlinie bedeutend besser. Hier beträgt die Schalllaufzeit zwischen 0 und 210ms und die Pegel bewegen sich in einem vorteilhafteren Bereich. Störend ist hier jedoch neben möglichen Hindernissen zwischen Schallquelle und Mikrofon und dem Publikum in der Haupteinfallrichtung die unsymmetrische Aufstellung. Ein Pass auf der entfernten Seite kommt später und mit einem wesentlich geringeren Pegel



an, als auf der Seite, an der das Mikrofon platziert ist, obwohl die Ereignisse möglicherweise in gleich engem Bildausschnitt gezeigt werden. Eine Lösung wäre die zusätzliche Mikrofonierung der Gegenseite, was eine doppelte Anzahl an Mikrofonen bedeuten würde.

Die alternative Position löst dieses Problem durch eine zur Spielrichtung symmetrische Aufstellung hinter dem Tor. Natürlich ergeben sich auch hier wieder ein Pegelgefälle und eine erhöhte Schalllaufzeit zur Mitte hin, allerdings passt dies besser zur Spieldramaturgie. Aktionen direkt vor dem Tor, die meist auch emotional bewegender sind, werden präsenter und direkter dargestellt. Der erhöhte Pegel kommt auch dem Störgeräusch-Abstand zugute, da das Publikum bei Spielaktionen vor dem Tor tendenziell lauter wird.

Durch die erhöhte Position werden mögliche Verdeckungen vermieden und der Aufbau beeinträchtigt die Zuschauersicht nur unwesentlich. Prinzipiell bietet diese Position die Vorteile der beiden anderen Positionen, lediglich ein Schutz vor Wettereinflüssen, wie ihn die Position bei der Führungskamera geboten hätte, ist hier nicht vorhanden.

Diese Position wurde bereits für die Mikrofontests gewählt und hat sich bei diesem praktischen Einsatz bewährt. Lediglich die Geräusche aus dem Mittelfeld waren etwas schwach. Bei Bedarf könnte diese Mikrofonaufstellung auch durch zwei weitere Mikrofone ergänzt werden. Diese würden dann idealerweise an den Seitenlinien auf Höhe der Mittellinie, oder aus praktischen Gründen auch leicht versetzt, stehen. Damit könnten die im Mittelfeld stattfindenden Ballkontakte noch besser abgedeckt werden. Es ist allerdings fraglich, ob sich dieser erhöhte technische und materielle Aufwand tatsächlich lohnt. Fraglich ist außerdem, ob ein hohes Stativ wirklich an den Seitenrändern aufgestellt werden darf.

Für das zu entwickelnde Nachführsystem wird diese Position als Standard festgelegt, da sie die meisten Vorteile hat. Aus rein technischer Sicht ist es aber auch kein Problem, die Position bei Bedarf zu ändern. Entsprechende Optionen werden in der Steuersoftware vorgesehen.

3.4 Betrachtung der notwendigen Bewegungsgrade

Das AT895 besitzt laut Datenblatt einen Akzeptanzwinkel von $\pm 10^\circ$ bei Frequenzen unterhalb 4kHz, darüber weitet sich der Winkel auf bis zu $\pm 30^\circ$. Schallpegel, die in diesen Grenzwinkeln auftreten, erfahren eine Abschwächung von 3dB. Auch wenn diese Zahlen keine scharfe



Grenze darstellen, muss das Nachführsystem sicherstellen, dass die Schallereignisse immer innerhalb dieses Winkelbereiches liegen.

Betrachtet man allein die horizontalen Schwenkvorgänge, so wird ersichtlich, dass es notwendig ist, einen Bereich von nahezu 180° abschwanken zu können, um das komplette Spielfeld zu erfassen. Wäre der vertikale Winkel fixiert, so würde das bedeuten, dass, je weiter Richtung Ecke geschwenkt wird, immer mehr Publikum in die Haupteinfallrichtung aufgenommen wird. Hier kommen nun die Vorteile der erhöhten Position zum Tragen. Diese dient nämlich nicht nur der Vermeidung von „Sichtbehinderungen“, sondern auch zur Vermeidung von Publikumsschall in der Haupteinfallrichtung. Wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** erkennbar ist, lässt sich durch eine genügend steile Ausrichtung nach unten der Haupteinfallsbereich wirksam vom Publikum fernhalten.

Dies erfordert allerdings auch eine durchdachte Ansteuerung. Würde das Mikrofon mit seiner 0° -Achse immer starr auf den Ball ausgerichtet sein, so käme bei einer Ballbewegung zur Seitenlinie sehr schnell das Publikum in den 20° Bereich. Der Schwenk muss vorher so begrenzt werden, dass der Ball innerhalb des Haupteinfallsbereichs ist, das Publikum aber noch außerhalb. Da der Akzeptanzwinkel nicht so scharf definiert werden kann, sind hier noch Versuche durchzuführen.

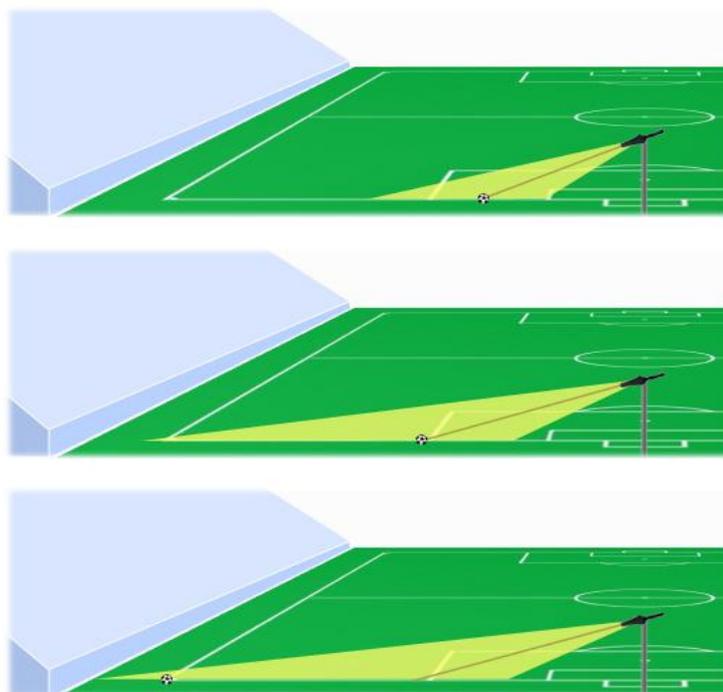


Abbildung 9 - vertikales Schwenken mit Begrenzung



Der zu definierende maximale Schwenkbereich in der vertikalen Achse muss nahezu 90° betragen, damit vom Mittelfeld bis zum Tor alle Bereiche abgedeckt werden. Damit sind die Mindestanforderungen für das notwendige Bewegungsausmaß der Nachführung bestimmt.

4. Planung des Gesamtsystems

Durch die Tests und die geometrischen Betrachtungen des Spielfeldes sind der zu verwendende Mikrofontyp und die Aufstellung der Mikrofone festgelegt. Dies ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung des kompletten Systems. Folgender Ansatz wurde hierfür entwickelt:

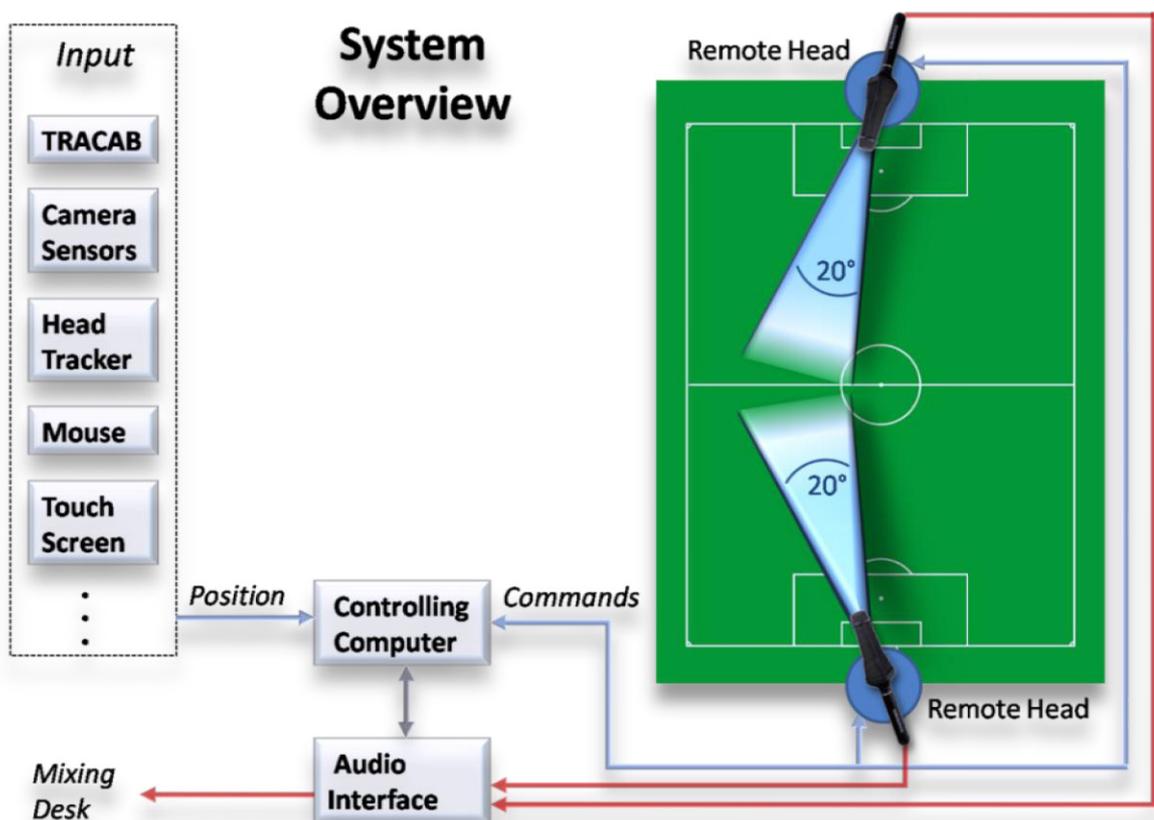


Abbildung 10 - System Overview

Hinter jedem Tor wird ein Audio Technica AT895 platziert. Das Mikrofon kann mithilfe einer Nachführvorrichtung, im Folgenden aufgrund der Parallele zum Videobereich als Remote Head bezeichnet, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung geschwenkt werden.



Das Gerät wird oben an den Pfosten des Ballfangnetzes, möglichst von hinten befestigt, oder alternativ durch ein Kurbelstativ auf eine Höhe von ca. 8m gebracht.

Die Ansteuerung der Remote Heads erfolgt durch einen Steuerrechner. Dieser ist idealerweise als Laptop ausgeführt, um das System möglichst portabel zu halten. Die Steuerungssoftware kommuniziert mit den Remoteheads mithilfe eines Protokolls, das eine bidirektionale Datenübertragung erlaubt. Damit kann einerseits die Steuerungssoftware ihre Positionsbefehle an die Remoteheads schicken, diese jedoch auch Ist-Position und Statusinformationen zurücksenden. Damit ist eine Überprüfung der korrekten Funktionsweise der Nachführung möglich.

Für eine automatisierte Nachführung muss natürlich auch jederzeit die Ballposition bekannt sein. Wichtig ist in diesem Fall nur, dass der Steuerrechner an seinem Eingang kontinuierlich mit Koordinaten versorgt wird. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, wie diese Daten erfasst werden. Als Standard Datenquelle wird das TRACAB Image Tracking SystemTM der schwedischen Firma TRACAB verwendet. Es liefert hochgenaue 3D-Echtzeitkoordinaten des Balles. Für eine größtmögliche Flexibilisierung des Systems sind aber auch andere Eingangsquellen möglich. So können auch Schwenk-/Neigedaten einer Kamera zur Ansteuerung verwendet werden, oder der Ball manuell mittels Maus oder Touch-Screen verfolgt werden. Auf die einzelnen Tracking-Möglichkeiten wird in Kapitel 5 noch näher eingegangen. Damit ist eine große Flexibilität gewährleistet, die auch bei einer Portierung des Systems auf andere Sportarten nützlich ist.

Mit dieser Anordnung ist es möglich, die Mikrofone so anzusteuern, dass sie zu jedem Zeitpunkt genau auf den Ball ausgerichtet sind. Doch darf hier der Einfluss der Schalllaufzeit nicht vernachlässigt werden. So kann es bei großer Ballgeschwindigkeit unter Umständen passieren, dass das Mikrofon schon wieder auf eine andere Position ausgerichtet ist, wenn die Schallwellen des vorherigen Ereignisses am Mikrofonstandpunkt eintreffen. So ist für die Nachführung ein variabler zeitlicher Versatz einzuhalten, der abhängig von der Entfernung des Balls zum Mikrofon ist. Ein weiterer zeitlicher Versatz entsteht durch die Verarbeitungszeit der einzelnen Komponenten. Auch diese „Systemlatenz“ muss berücksichtigt werden.

Das Gesamtkonzept des zu entwickelnden Systems umfasst auch eine automatische Signalbearbeitung der Mikrofonsignale. Die Audiosignale aller Mikrofonsysteme werden über ein Audio-Interface geführt, das die einzelnen Signale bearbeitet, mischt und



anschließend eine Summe zum Mischpult im Übertragungswagen gibt. Für diese Bearbeitung können ebenfalls die Echtzeitkoordinaten des Balles herangezogen werden. So ließe sich das Verhalten so steuern, dass immer nur das Mikrofon offen ist, auf dessen Seite sich der Ball befindet. Auch eine Bearbeitung mit Filtern und Kompressoren ist in diesem Schritt möglich, ob hier eine Abhängigkeit der Parameter von der Ballposition sinnvoll ist, kann erst durch Experimente herausgefunden werden.

Die Ausgabe dieses Systems ist letztendlich ein fertig bearbeitetes und optimiertes Audio-Signal, das hauptsächlich die Feldgeräusche und nur noch geringfügige Schallanteile vom Publikum enthält. Dieses Signal wird dem Toningenieur im Ü-Wagen angeboten, der es mit den Signalen der Atmo-Mikrofonierung zu einer lebendigen, bildbezogenen Mischung zusammenfügt.

5. Ball-Tracking

Die automatische Erfassung der Spieler- und Ballpositionen gewinnt im Fußball mehr und mehr an Bedeutung. Das Interesse kommt von vielen Seiten.

Zunächst sind es Journalisten und Kommentatoren, die sowohl in Echtzeit als auch nach einem Spiel in verschiedensten Publikationen den Zuschauer mit statistischen Daten wie Laufstrecken der Spieler, Anzahl der Ballkontakte oder Torschüsse versorgen. So sind statistische Daten zu Fußballspielen beispielsweise aus Zeitungsartikeln oder Internetseiten nicht mehr wegzudenken. Eine neue Dimension dieser Echtzeit-Analyse wird rechtzeitig zur EM2008 mit dem „Castrol Performance Index“ erreicht. Auf einer Internetseite wird dem Zuschauer in Echtzeit eine Flut von zusätzlichen Daten, zu den einzelnen Spielern wie zum gesamten Verlauf angeboten.⁶ So finden sich beispielsweise Aussagen über Torschüsse, Fouls, Ecken, Abseits, Ballbesitz, Lauftempo, Laufdistanz, Schuss-Geschwindigkeit, Ballkontakte einzelner Spieler, Zonendeckung und vieles mehr. Die zugrundeliegenden Daten werden über das TRACAB Image Tracking SystemTM erfasst.⁷ Offenbar steigt bei den

⁶ <http://www.castrolindex.com>, Abruf: 08.06.2008

⁷ vgl. o.V. (2008)



Zuschauern immer stärker die Nachfrage nach diesen zusätzlichen, tiefer gehenden Informationen. Damit bietet sich ein neuer Markt und es wird rentabel, über neue technische Wege diese Nachfrage zu befriedigen.

Aber nicht nur die Zuschauer haben ein steigendes Interesse an der gesteigerten Dichte der Datenerfassung. Wie die Süddeutsche Zeitung darstellt, werden die durch moderne Technik unterstützten Spielanalysen immer wichtiger für alle professionellen Fußballvereine, auch auf internationaler Ebene.⁸ Längst geht es nicht mehr nur darum, die eigenen Fehler zu analysieren, es ist inzwischen auch zu einem wichtigen strategischen Vorteil geworden, so viele Daten wie möglich über den Gegner zu besitzen, um mögliche Schwachstellen ausfindig zu machen und seinen Stärken entsprechend zu begegnen. Auch der Marktwert internationaler Fußballer wird über die automatisch ermittelten statistischen Daten bestimmt, die Auskunft geben über deren physiologische Leistungsfähigkeit, Zweikampf-Stärken und taktisches Geschick.

Bislang erfolgte die statistische Datenerfassung während des Spiels noch von Hand über eine Reihe von Spielbeobachtern („Scouts“), die alle wichtigen Ereignisse in eine Datenbank eintrugen und diese Daten während und nach dem Spiel den verschiedenen Medien anboten. Der Trend geht jedoch hin zur automatischen Erfassung. In diesem Bereich forschen weltweit verschiedene Institute (z.B. Fraunhofer IIS Erlangen, TU München, Kingston University), und mehrere Firmen (z.B. Cairos technologies AG, TRACAB, PGI LTD, Mastercoach, Sports Analytics GmbH, SPORT UNIVERSAL PROCESS) präsentieren bereits konkurrierende Systeme mit unterschiedlichen technischen Ansätzen.

Diese Technisierung des Sports stößt natürlich an manchen Stellen auch auf Kritik. Die Entwicklung lässt sich jedoch nicht mehr aufhalten. So sagt Jens Urlbauer, Geschäftsführer der Firma Mastercoach gegenüber der Süddeutschen Zeitung: *"Mit Tracking-Analysen ist es genauso wie mit Mentaltrainern oder Laktattest. Die Akzeptanz dauert", sagt Urlbauer. "2010 wird die Frage aber nicht mehr heißen: Tracking, ja oder nein? Sondern höchstens noch: mit welcher Firma?"*⁹

⁸ vgl. Kielbassa, M. (2008)

⁹ Kielbassa, M. (2008)



Das Ball-Tracking wird im zukünftigen Fußballstadion zum Standard. In Bezug auf dieses Projekt hat dies den Vorteil, dass die Ball-Koordinaten ohnehin vorliegen werden. Es muss kein zusätzlicher technischer Aufwand mehr betrieben werden. Die Daten müssen nur noch genutzt werden.

Im Folgenden sollen kurz mehrere ausgewählte Ball-Tracking-Methoden vorgestellt werden, die im Rahmen dieses Projektes für eine automatische Mikrofon-Nachführung in Frage kommen.

5.1 Führungskamera

Bei der Systemauslegung im Rahmen der Vorarbeiten waren als Steuergrößen zur Nachführung die so bezeichneten „Metadaten“ der Führungskamera geplant. Es war angedacht, bereits vorhandene oder neu zu installierende Sensoren auszuwerten, die Informationen über den horizontalen und vertikalen Kamera-Winkel und über die aktuellen Zoom- und Fokuseinstellungen geben. Aus diesen Informationen und der Position der Kamera ist es möglich, den anvisierten Bereich auf dem Rasen zu berechnen.

Bei näherer Betrachtung der Bildausschnitte der Führungskamera wird jedoch schnell klar, dass der Öffnungswinkel der Kamera für eine Positionsbestimmung relativ groß ist. Die Aufgabe der Führungskamera ist ja auch, einen Überblick über das komplette Spielgeschehen zu gewähren. Der Ball befindet sich dabei selten im Bildmittelpunkt, sondern oft am Rand. Durch die Position der Kamera auf Höhe der Mittellinie ist die Vorhersage des Ballaufenthaltsortes im Mittelfeld noch nicht so problematisch wie im Bereich des Strafraumes.

Wie beispielhaft im Bildvergleich in Abbildung 11 zu sehen ist, ändert sich der Bildausschnitt innerhalb der Spielaktion nicht sehr stark. Im zweiten Bild ist lediglich der Zoom etwas stärker. Der Ball ist jedoch zunächst im linken Bildbereich platziert, kurz darauf im rechten. Das Mikrofon befindet sich direkt hinter dem Tor. Durch die Positionsänderung des Balles ergibt sich eine recht große Winkeländerung, die das Mikrofon nachvollziehen muss. Allein aufgrund der Kamera-Bewegungsdaten lässt sich diese große Winkeländerung aber nicht herleiten.



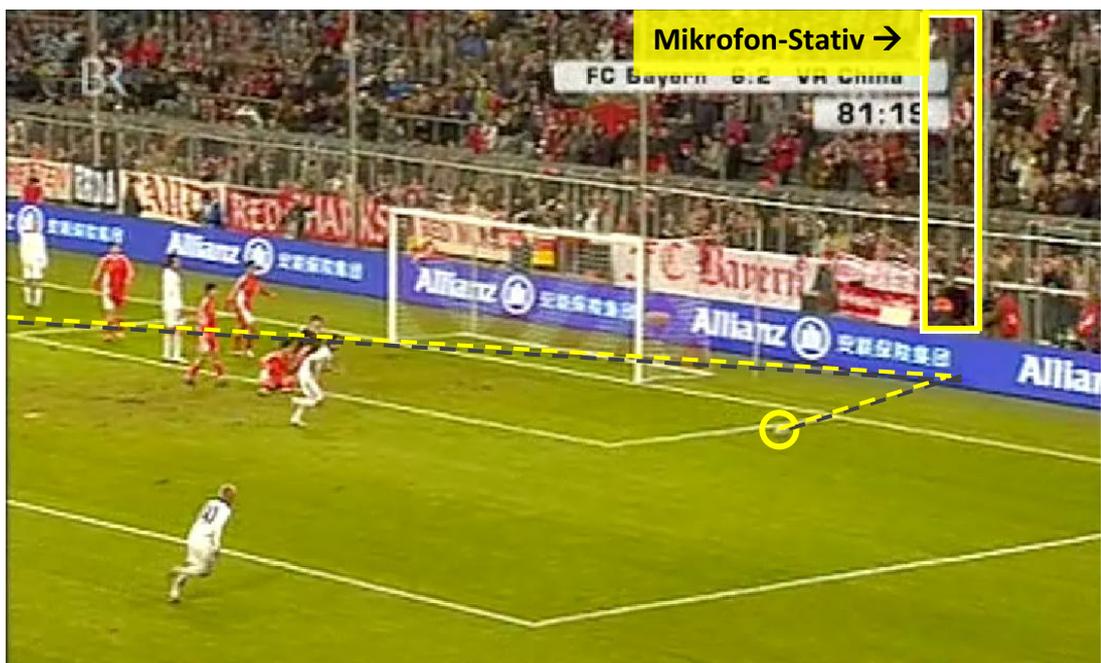


Abbildung 11 - Fallstudie bei den Testaufnahmen in der Allianz Arena

Anhand dieser Betrachtungen lässt sich erkennen, dass durch den relativ großen Bildausschnitt die Unschärfe bei der Ortsbestimmung des Balles viel zu groß ist, als dass das Mikrophon im Fußballstadion exakt gesteuert werden könnte. Allerdings sollte die Verwendung solcher „Kamera-Metadaten“ eine Option bleiben. Denn beim Einsatz in anderen Sportarten werden die Bewegungsdaten einer Kamera eventuell wieder sinnvoll, da dort andere



optische Verhältnisse herrschen können und damit wiederum andere Objektive verwendet werden.

5.2 Tracab¹⁰

Als beste Alternative in Zusammenhang mit der Mikrofon-Nachführung erscheint das TRACAB Image Tracking System™ der Firma TRACAB aus Schweden. Es erlaubt die dreidimensionale Erfassung von 22 Spielern, drei Schiedsrichtern und dem Ball in Echtzeit. Die Verzögerung durch Bildaufnahme, Bildverarbeitung und Auslieferung ist kleiner als die Dauer eines Video-Vollbilds und damit kleiner als 40ms. Die erreichte Orts-Auflösung ist nach Angaben von TRACAB besser als 10cm. Die Ausgabe der Ball-Koordinaten kann über einen Ethernet-Stream erfolgen.

Die Funktionsweise dieses Systems basiert auf der Auswertung von vier bis acht stereoskopischen Kamerapaaren, die das Spielfeld unter sich aufteilen. Die Kameras werden längs des Spielfeldes in einer Höhe von mindestens 20m und in einem Abstand von 10 bis 15m zueinander angebracht. Über Ethernet werden die Kameras mit dem zentralen Rechner verbunden, der die Bildverarbeitung vornimmt. Das System ist mobil und kann innerhalb weniger Stunden aufgebaut und kalibriert werden. Die gewonnenen Daten werden in erster Linie zur Erstellung von TV-Grafiken verwendet, können aber auch von anderen Medien für statistische Aussagen verwendet werden. Einer der Hauptvorteile ist, dass keinerlei Eingriffe in das Spiel, wie beispielsweise das Einbringen eines Transmitters in den Ball, stattfinden müssen. Wie das System auf eine optische Verdeckung des Balles reagiert ist noch nicht bekannt.

Das System hat sich bereits etabliert. Es wurde bisher bei einzelnen Spielen in Mexiko, Frankreich und Tschechien eingesetzt und begleitet alle Spiele der Schwedischen Liga. Nachdem das System von der UEFA schon bei der Champions League eingesetzt wurde, werden nun auch alle Spiele der Euro 2008 begleitet. Dabei liefert TRACAB auch die Daten für den „Castrol Performance Index“.

¹⁰ <http://www.tracab.com>



In Bezug auf dieses Projekt sind die Daten von TRACAB ideal, vor allem aufgrund der Echtzeitfähigkeit und der hohen Genauigkeit der Messungen. Eine 3D-Positionsermittlung ist dabei nicht einmal notwendig. Da der Ball ja nur Geräusche verursacht, wenn er sich in Bodennähe befindet, reichen auch die x- und y-Koordinaten der Spielfeldebene für die Nachverfolgung aus.

Der Kontakt mit TRACAB wurde bereits aufgenommen und die Firma hat Interesse an diesem Projekt signalisiert. Es gab bereits eine Einladung zu Tests nach Stockholm, wo das System fest im Stadion integriert ist. Der nächste Schritt ist aber zunächst die Klärung der technischen Details für die Ethernet-Schnittstelle.

5.3 Weitere Systeme

Wie berichtet gibt es verschiedene technische Ansätze für Ball-Tracking. Momentan ist TRACAB für den Einsatz bei Fernsehproduktionen wohl eines der etabliertesten. Welche Entwicklungen auf diesem Gebiet stattfinden werden, lässt sich noch nicht abschätzen. Prinzipiell funktioniert die Mikrofon-Nachführung aber mit jeder Art von Tracking-Verfahren, sobald Daten in Echtzeit und mit ausreichender Genauigkeit ausgegeben werden. Somit ist das System nicht an TRACAB gebunden sondern kann auch mit zukünftigen Verfahren verwendet werden.

Für Fußballspiele, die momentan noch nicht von einem automatisierten Ball-Tracking-Verfahren erfasst werden, ist ein Einsatz des Nachführ-Systems trotzdem mithilfe eines Operators denkbar. Der Operator könnte mit einer Art Fernrohr den Ball nachverfolgen. Mithilfe von Sensoren können wiederum die Schwenk- und Neigedaten ausgelesen und zur Positionsberechnung verwendet werden. Diese Methode würde dem Ansatz mit der Führungskamera entsprechen, allerdings hätte das Fernrohr einen sehr kleinen Öffnungswinkel und die Positionsbestimmung wäre entsprechend genauer. Auf dieser Basis bietet die französische Firma Manapps mit ihrem Produkt „Stadmaster“ bereits ein kommerzielles System an.

Auch die Nachverfolgung des Balles auf einem Bildschirm mittels Maus oder Touchpad wäre eine Option. In diesem Fall müsste eine Kamera verwendet werden, die das komplette Spielfeld von einem möglichst hohen Punkt aus aufnimmt. Ein Operator könnte so anhand dieses Videobildes den Ball nachverfolgen und damit seine Position bestimmen.



Zum Zeitpunkt der Recherchen für diese Diplomarbeit war noch ein weiteres vielversprechendes Tracking-Verfahren in der Entwicklung, auf das hier kurz eingegangen werden soll. Das funkgestützte 3D-Ortungs-System, das von der Karlsbader Firma Cairos Technologies AG, dem Fraunhofer IIS in Erlangen und Adidas gemeinsam entwickelt wurde, arbeitet mit Funksignalen, die ein im Ball eingebrachter Transmitter aussendet und die von Antennen rund um das Feld empfangen werden. Aufgrund der Laufzeitunterschiede an den Empfangsorten wird die Position des Balles ermittelt. Der Haupteinsatzzweck war die Erkennung eines gültigen Tores. Die versprochene Genauigkeit lag im cm-Bereich. Dieser Ansatz hätte die Probleme der Verdeckung, die beim Videotracking herrschen, beseitigt.

Noch im Herbst 2005 war geplant, das System bei der WM2006 in Deutschland einzusetzen. Doch nach negativen Tests im Vorfeld der WM wurde das System dann als zu unzuverlässig eingestuft. Inzwischen wurde das Projekt aufgegeben. Die Firma Cairos konzentriert sich mit einer neuen Technik¹¹ nur noch auf den direkten Torbereich, was für unsere Anwendung uninteressant ist.

6. Konstruktion des Remote Heads

Ein wesentlicher Teil des Gesamtkonzepts sind die Remote Heads. In diesem Kapitel soll der komplette Konstruktionsprozess als Grundlage für einen ersten Prototypen dargestellt werden. Zunächst gilt es, die notwendigen Vorgaben zusammenzutragen, die das Gerät erfüllen muss.

6.1 Anforderungen

Eine der Grundvoraussetzungen ist eine Beweglichkeit entsprechend des bereits festgelegten Bewegungsausmaßes. Das heißt, das Gerät muss in der Lage sein, das Mikrofon um 180° zu schwenken und um 90° zu neigen. Idealerweise sind die Achsen sogar noch weiter beweglich, damit auch der Einsatz bei anderen Sportarten mit eventuell höheren Anforderungen problemlos möglich ist. Desweiteren müssen die Achsen bestimmte Winkelgeschwindig-

¹¹ vgl Ziegler, P. (2008)



keiten und Beschleunigungen erreichen, die ausreichend sind, um dem Ball ständig folgen zu können. Der Winkel soll dabei möglichst genau eingestellt werden können. Die Motorsteuerungen müssen in der Lage sein, eine bidirektionale Kommunikation mit dem Steuerrechner über ein geeignetes Protokoll durchzuführen.

Die akustischen Anforderungen verlangen eine möglichst geringe Schallabstrahlung in Form von Luftschall und eine möglichst gute Dämpfung der Körperschallanteile, so dass diese am Mikrofon möglichst kein elektrisches Signal hervorrufen. Ziel ist es, die vom Remote-Head verursachten Geräuschpegel so gering zu halten, dass die einwandfreie Funktionsweise des Systems nicht eingeschränkt wird.

Weitere Anforderungen an das Gerät sind eine möglichst geringe Abmessung und ein möglichst geringes Gewicht, so dass die Anbringung auf einem Stativ unproblematisch ist. Die zur Verfügung stehende Versorgungsspannung beträgt 230V AC/ 50 Hz.

6.2 Prinzipieller Aufbau

Das Herzstück des Remote-Heads sind die Motoren. Damit alle gestellten Anforderungen erfüllt werden können, gilt es, diese entsprechend zu dimensionieren. Doch bevor die notwendigen Leistungsdaten berechnet werden können, muss erst einmal der prinzipielle Aufbau feststehen. Dieser hat sich nach einigen Überlegungen über die zu erreichenden Ziele folgendermaßen herauskristallisiert:

Auch wenn besonders leise Motoren gefunden werden können, werden diese, vor allem bei Belastung immer noch einen gewissen Grad an Luftschall und Körperschall abgeben. Deshalb sollten die Motoren zur Dämpfung des Luftschalls beide in einem Gehäuse untergebracht sein und zugleich über geeignete Elemente bezüglich Körperschall vom Gehäuse entkoppelt werden. Verwendet werden soll ein nach oben offenes Gehäuse, das von einem Drehteller abgedeckt wird. Wie in Abbildung 12 dargestellt, ist der auf der Grundplatte befestigte untere Motor für die Drehung zuständig und trägt dabei die restlichen Komponenten. Damit ist der ganze in der Zeichnung rötlich markierte Bereich drehbar.

Direkt oberhalb des Drehmotors ist über eine Befestigung der Schwenkmotor angebracht. Auf diese Befestigung wird durch Gummipuffer getrennt der Drehteller aufgesetzt. Fest auf dem Drehteller fixiert sind die beiden Trägerplatten, zwischen denen die Mikrofonhalterung



wie ein Trapez hängt. Durch die Verbindung über Kugellager lässt sich die Mikrofonhalterung schwenken. Auf der Mikrofonhalterung sind zwei Gummiringe festgeschraubt, in die das AT895 eingesteckt wird.

Das vertikale Schwenken wird über einen Zahnriemen bewerkstelligt, der das Drehmoment des Schwenkmotors durch den Drehteller hindurch bis zur Schwenkachse überträgt. Dadurch lässt sich der komplette gelb markierte Bereich schwenken. Der Motor ist damit weit vom Mikrofon entfernt schallgeschützt im Gehäuse untergebracht, der Zahnriemen überträgt die Bewegung geräuschfrei und dient ebenfalls zur Körperschallentkopplung. Somit sind keine Körperschallbrücken zwischen den Antriebsmotoren und dem Mikrofon vorhanden.

Durch diese Konstruktion dreht sich das Mikrofon immer um seinen Schwerpunkt, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung.

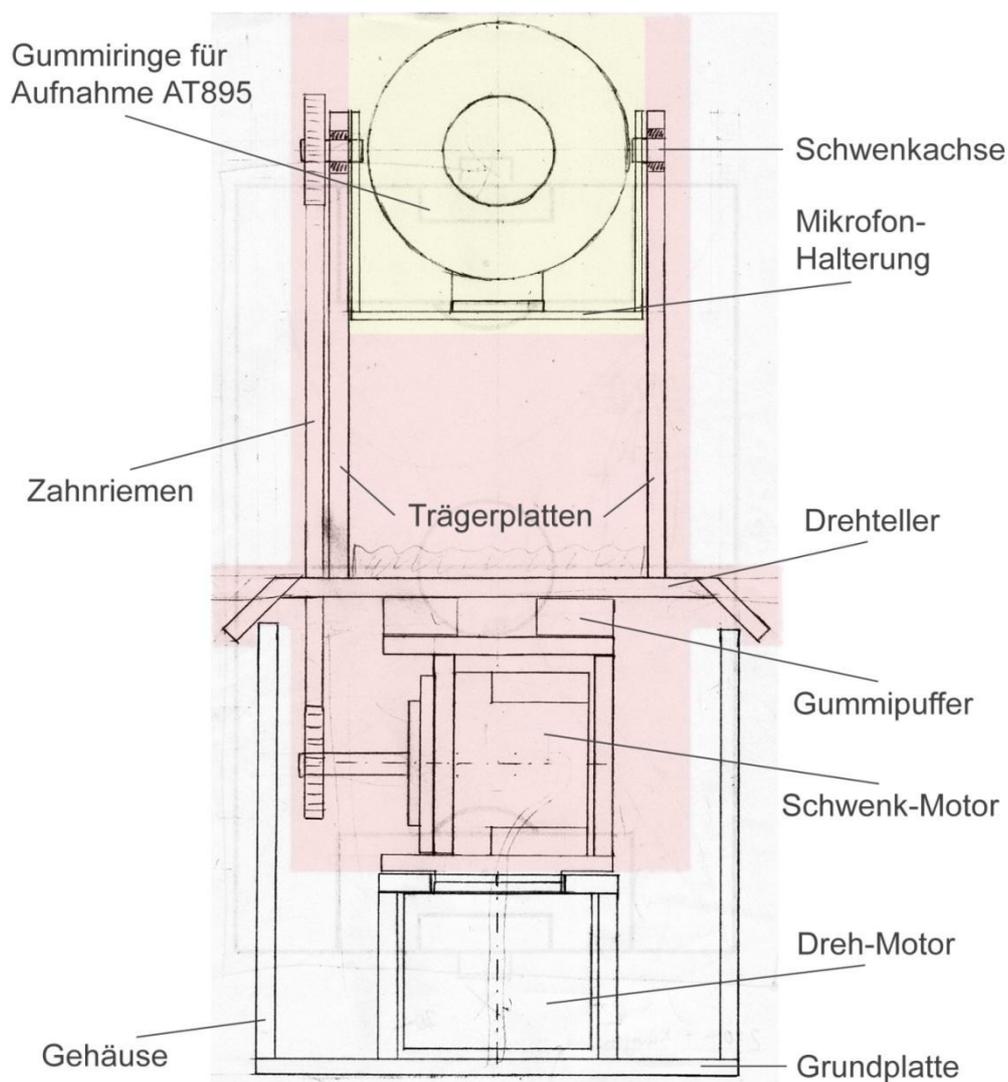


Abbildung 12 - erste Konstruktionsskizze



6.3 Auswahl geeigneter Motoren

Von dieser Grundkonstruktion ausgehend lassen sich nun die Motoren dimensionieren. Sie müssen genügend Drehmoment erzeugen, um die hohen erforderlichen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten umzusetzen und eine möglichst hohe Auflösung, um eine akkurate Winkelstellung zu ermöglichen. Kann das Mikrofon aufgrund einer hohen Ballgeschwindigkeit nicht schnell genug nachgeführt werden, geht unter Umständen ein Geräusch, das durch einen im Bild deutlich sichtbaren Ballkontakt hervorgerufen wird, verloren. Dies muss vermieden werden.

Im Folgenden sollen nun die Momente berechnet werden, die die Motoren aufbringen müssen, um einem Ball auch unter extremen Bedingungen folgen zu können. Da nicht alle Rahmenbedingungen bekannt sind, sind zunächst einige Annahmen und Vorüberlegungen notwendig. Dabei müssen die beiden Achsen jeweils für sich betrachtet werden.

Angenommen wird zunächst, dass sich das Mikrofon mittig hinter dem Tor 8m hinter der Torlinie und in 6m Höhe befindet. Die Geschwindigkeit, die der Ball maximal haben kann, wird auf 120 km/h festgelegt. In der Literatur werden die unterschiedlichsten Werte für die maximale Ballgeschwindigkeit gefunden¹². Dabei taucht auch ein Spitzenwert von 193 km/h auf, der aber sicherlich so gut wie nie auftreten wird. Überwiegend wird von wesentlich niedrigeren Maximalgeschwindigkeiten berichtet, bei denen 120 km/h schon die obere Grenze darstellt.

6.3.1 Berechnung der maximalen Geschwindigkeit und Beschleunigung

Zunächst muss nach den Extremfällen gesucht werden, in denen die Motoren am stärksten belastet werden. Dies ist der Fall, wenn die Bewegung des Balles entweder die maximale Drehgeschwindigkeit oder die maximale Drehbeschleunigung des Mikrofans hervorruft.

Für die horizontale Drehung ergibt sich die maximale Winkelgeschwindigkeit für den Fall, dass sich der Ball mit maximaler Geschwindigkeit tangential in minimaler Entfernung am Mikrofon vorbeibewegt. Diese minimale Entfernung wird erreicht, wenn sich der Ball parallel

¹² vgl. Aigner, A. (2001), S. 6



zur hinteren Torlinie bewegt und beträgt $r_{\min} = 8\text{m}$. Käme der Ball dem Mikrofon noch näher, so würde er hinter dem Tor im Aus landen und müsste nicht mehr nachverfolgt werden.

Mit einer maximalen Ballgeschwindigkeit von $v_{\max} = 120\text{ km/h} = 33,3\text{ m/s}$ tangential zur Drehachse ergibt sich die maximale Winkelgeschwindigkeit:

$$(1.1) \quad \omega_{\max} = \frac{v_{\max}}{r_{\min}} = \frac{33,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{8\text{m}} = 4,2 \frac{1}{\text{s}} \stackrel{\triangle}{=} \frac{240^\circ}{\text{s}} \stackrel{\triangle}{=} 40 \frac{\text{Umdr.}}{\text{min}}$$

Die maximale Beschleunigung tritt auf, wenn die Bewegungsrichtung des Balles z.B. durch einen Abwehrschlag des Torwartes gerade dann umgekehrt wird, wenn er die maximale Geschwindigkeit und den minimalen Abstand zum Mikrofon hat. Durch die Umkehrung der Bewegungsrichtung ist die Geschwindigkeitsdifferenz damit $2 \cdot \omega_{\max}$. Die Zeit, in der sich diese Geschwindigkeitsänderung vollzieht, hängt von verschiedenen Komponenten wie z.B. der Elastizität des Balles und der Art des Schusses ab. Hierzu konnten keine verlässlichen Untersuchungen gefunden werden. Bei der Analyse von Videobildern wurde ersichtlich, dass die Beschleunigungszeit kürzer als ein Video-Vollbild sein muss. Da durch die zeitliche Auflösung der von TRACAB gesendeten Ball-Koordinaten die Position des Balles sowieso nur alle 40ms bekannt wird, wird dieser Wert zur Berechnung verwendet. Damit lässt sich die maximale Beschleunigung berechnen:

$$(1.2) \quad \alpha_{\max} = \frac{2 \cdot \omega_{\max}}{t} = \frac{8,4 \frac{1}{\text{s}}}{0,04\text{s}} = 210 \frac{1}{\text{s}^2}$$

Da für die vertikale Bewegung vergleichbare Verhältnisse herrschen, werden für die Schwenkachse die gleichen Werte für maximale Geschwindigkeit und maximale Beschleunigung verwendet.

6.3.2 Berechnung der maximal aufzubringenden Drehmomente

Das Drehmoment ist eine wichtige Kenngröße eines Motors. Zur Berechnung des Drehmoments, das die Motoren in dieser Anwendung maximal aufbringen müssen, sind die eben



berechnete maximale Beschleunigung und das Massenträgheitsmoment der zu drehenden Massen notwendig. Diese Trägheitsmomente müssen zuerst berechnet werden.

Für die Schwenkachse muss in das Massenträgheitsmoment das Mikrofon, die Halterung und die beiden Zahnriemenscheiben des Antriebs mit einbezogen werden. Die die Rechnung aufgrund des noch nicht vorhandenen genauen Aufbaus nur einen Näherungswert ergibt, können kleinere Einflüsse wie z.B. der Zahnriemen vernachlässigt werden. Für die Drehachse müssen zusätzlich zu den oben genannten Komponenten auch die Trägerplatten, der Drehteller und der Schwenkmotor mit einbezogen werden. Jedes der beiden Trägheitsmomente muss in Bezug zur entsprechenden Drehachse berechnet werden.

Vertikale Achse

Da eine Abschätzung ausreichend ist, werden das Mikrofon und die Zahnriemenscheiben auf zylindrische Grundkörper und die Halterung auf einen Quader reduziert. Die Masse des zylindrischen Ersatzkörpers für das Mikrofon ergibt sich folgendermaßen:

$$(1.3) \quad m_{\text{Mikrofon}} = m_{\text{Mikrofonkörper}} + m_{\text{Zeppelin}} + m_{\text{Ringe}} = 473\text{g} + 142\text{g} + 100\text{g} = 715\text{g}$$

Die Masse des Quaders ergibt sich aus den geschätzten Abmessungen der Grundplatte der Mikrofonhalterung und der Dichte von Aluminium ($\rho_{\text{Alu}} = 2,7\text{g/cm}^3$) zu:

$$(1.4) \quad m_{\text{Halterung}} = l \cdot b \cdot h \cdot \rho_{\text{Alu}} = 15\text{cm} \cdot 8\text{cm} \cdot 0,3\text{cm} \cdot 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 97\text{g}$$

Die Masse der Zahnriemenscheiben ergibt sich aus dem Volumen und der Dichte von Aluminium:

$$(1.5) \quad m_{\text{Scheibe}} = V \cdot \rho_{\text{Alu}} = r^2 \cdot \pi \cdot b \cdot \rho_{\text{Alu}} = 2,5\text{cm}^2 \cdot \pi \cdot 2,3\text{cm} \cdot 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 122\text{g}$$

Aus den Abmessungen und den Massen der Ersatzkörper ergeben sich die folgenden Massenträgheitsmomente:



$$\begin{aligned}
 (1.6) \quad J_{\text{Mikrofon}} &= \frac{1}{4} \cdot m_{\text{Mikrofon}} \cdot r^2 + \frac{1}{12} \cdot m_{\text{Mikrofon}} \cdot l^2 = \\
 &= \frac{1}{4} \cdot 0,715\text{kg} \cdot (0,02\text{m})^2 + \frac{1}{12} \cdot 0,715\text{kg} \cdot (0,355\text{m})^2 = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2
 \end{aligned}$$

Da sich die Halterung nicht um ihren Schwerpunkt dreht, muss der Satz von Steiner¹³ angewendet werden. Durch diesen Satz lässt sich das Massenträgheitsmoment eines Körpers bezüglich einer Drehachse berechnen, die nicht durch den Schwerpunkt geht. Die Drehachse hat dabei von der zu ihr parallelen Achse durch den Schwerpunkt den Abstand s .

$$\begin{aligned}
 (1.7) \quad J_{\text{Halterung}} &= J_{\text{Halterung(Schwerpunkt)}} + m \cdot s^2 = \frac{1}{12} \cdot m_{\text{Halterung}} \cdot h^2 + l^2 + m_{\text{Halterung}} \cdot s^2 = \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 0,097\text{kg} \cdot 0,03\text{m}^2 + 0,15\text{m}^2 + 0,097\text{kg} \cdot 0,05\text{m}^2 = \\
 &= 0,43 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2
 \end{aligned}$$

$$(1.8) \quad J_{\text{Scheibe}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,122\text{kg} \cdot 0,025\text{m}^2 = 0,04 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

Damit ergibt sich das gesamte Massenträgheitsmoment für die vertikale Achse:

$$\begin{aligned}
 (1.9) \quad J_{\text{vertikal}} &= J_{\text{Mikrofon}} + J_{\text{Halterung}} + 2 \cdot J_{\text{Scheibe}} = \\
 &= 7,6 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2 + 0,43 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2 + 0,08 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2 \approx \\
 &\approx 8,1 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2
 \end{aligned}$$

Aus der Winkelbeschleunigung und dem nun bekannten Massenträgheitsmoment lässt sich das Drehmoment ausrechnen, das der Motor zum Schwenken maximal aufbringen muss:

$$(1.10) \quad M_{\text{vertikal}} = J_{\text{vertikal}} \cdot \alpha_{\text{max}} = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2 \cdot 210 \frac{1}{\text{s}^2} = 1,7 \text{Nm}$$

¹³ vgl. Kuchling, H. (2001), S. 128



Horizontale Achse

Der Motor für die Drehung in horizontaler Ebene muss ein größeres Drehmoment aufbringen können, da er bei gleicher Beschleunigung ein größeres Massenträgheitsmoment antreiben muss. Hier haben auch die Trägerplatten, der Drehteller und der Motor einen Einfluss.

$$(1.11) \quad m_{\text{Trägerplatte}} = l \cdot b \cdot h \cdot \rho_{\text{Alu}} = 12\text{cm} \cdot 0,5\text{cm} \cdot 20\text{cm} \cdot 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 324\text{g}$$

$$(1.12) \quad m_{\text{Drehteller}} = r^2 \cdot \pi \cdot d \cdot \rho_{\text{Alu}} = 10\text{cm}^2 \cdot \pi \cdot 0,8\text{cm} \cdot 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 679\text{g}$$

Da noch kein Motor ausgewählt wurde, wird eine Masse von $m_{\text{Motor}} = 500\text{g}$ und eine Würfelform mit 5cm Kantenlänge angenommen.

Die Trägheitsmomente aller Komponenten berechnen sich wie folgt:

$$(1.13) \quad J_{\text{Motor}} = \frac{1}{12} \cdot m_{\text{Motor}} \cdot (l^2 + b^2) = \frac{1}{12} \cdot 0,5\text{kg} \cdot (0,05\text{m}^2 + 0,05\text{m}^2) = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

$$(1.14) \quad J_{\text{Drehteller}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,679\text{kg} \cdot 0,1\text{m}^2 = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

Da die Trägerplatten laut der ersten Skizze ca. 6cm vom Drehpunkt versetzt angebracht sind, muss hier wieder der Steiner'sche Verschiebesatz angewendet werden:

$$(1.15) \quad J_{\text{Trägerplatte}} = J_{\text{Trägerplatte(Schwerpunkt)}} + m_{\text{Trägerplatte}} \cdot s^2 = \frac{1}{12} \cdot m_{\text{Trägerplatte}} \cdot (l^2 + b^2) + m_{\text{Trägerplatte}} \cdot s^2 = \frac{1}{12} \cdot 0,324\text{kg} \cdot (0,12\text{m}^2 + 0,005\text{m}^2) + 0,324\text{kg} \cdot 0,06\text{m}^2 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$



$$(1.16) \quad J_{\text{Halterung}} = \frac{1}{12} \cdot m_{\text{Halterung}} \cdot l^2 + b^2 = \frac{1}{12} \cdot 0,097\text{kg} \cdot 0,15\text{m}^2 + 0,08\text{m}^2 = \\ = 0,23 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

$$(1.17) \quad J_{\text{Mikrofon}} = \frac{1}{4} \cdot m_{\text{Mikrofon}} \cdot r^2 + \frac{1}{12} \cdot m_{\text{Mikrofon}} \cdot l^2 = \\ = \frac{1}{4} \cdot 0,715\text{kg} \cdot (0,02\text{m})^2 + \frac{1}{12} \cdot 0,715\text{kg} \cdot (0,355\text{m})^2 = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

Der Satz von Steiner wird auch wieder relevant, wenn das Trägheitsmoment der Zahnriemenscheiben berechnet wird, da diese ca. 7cm von der Drehachse entfernt sind.

$$(1.18) \quad J_{\text{Scheibe}} = J_{\text{Scheibe(Schwerpunkt)}} + m \cdot s^2 = \frac{1}{4} \cdot m_{\text{Scheibe}} \cdot r^2 + \frac{1}{12} \cdot m_{\text{Scheibe}} \cdot b^2 + m_{\text{Scheibe}} \cdot s^2 = \\ = \frac{1}{4} \cdot 0,122\text{kg} \cdot 0,025\text{m}^2 + \frac{1}{12} \cdot 0,122\text{kg} \cdot 0,023\text{m}^2 + 0,122\text{kg} \cdot 0,07\text{m}^2 = \\ = 0,62 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

Das resultierende Massenträgheitsmoment ergibt sich aus der Summe:

$$(1.19) \quad J_{\text{horizontal}} = J_{\text{Motor}} + J_{\text{Drehteller}} + 2 \cdot J_{\text{Trägerplatte}} + J_{\text{Halterung}} + J_{\text{Mikrofon}} + 2 \cdot J_{\text{Scheibe}} = \\ = 0,21 + 3,4 + 2 \cdot 1,6 + 0,23 + 7,6 + 2 \cdot 0,62 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2 = \\ = 15,9 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$$

Aus diesem Ergebnis lässt sich wiederum mit der maximalen Beschleunigung das aufzubringende Drehmoment für die Dreh-Achse berechnen:

$$(1.20) \quad M_{\text{horizontal}} = J_{\text{horizontal}} \cdot \alpha_{\text{max}} = 15,9 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2 \cdot 210 \frac{1}{\text{s}^2} = 3,34 \text{Nm}$$

Da die betrachteten Bedingungen für die Auslegung sowieso schon extrem sind, ist ein weiterer Sicherheitsfaktor nicht notwendig. Damit werden zwei Motoren mit folgenden Eigenschaften gesucht:



	Dreh-Motor	Schwenk-Motor
max. Drehzahl	40 U/min	40 U/min
max. Drehmoment	3,34Nm	1,7Nm

6.3.3 Auswahl eines geeigneten Motors

Die Recherche nach geeigneten Motoren gestaltete sich zunächst als schwierig. Das größte Problem waren die hohen Kosten für Motoren in der entsprechenden Leistungskategorie und die langen Lieferzeiten. Selbst die Erstellung eines Angebots dauerte oft sehr lange.

Der heikelste Punkt bei der Suche war, dass es keine qualifizierten Aussagen der Hersteller über die Geräusentwicklung der Motoren gab. Generell wird versucht, Motoren für Industrieanwendungen aus Lärmschutzgründen so leise wie möglich zu bauen. Jedoch werden in den Datenblättern keine quantitativen Aussagen über die Geräuschemission gemacht, und auch auf Nachfrage konnten oft nur qualitative Aussagen gemacht werden.

Da bekanntermaßen bürstenlose Gleichstrommotoren sehr leise laufen, beschränkte sich die Suche auf diesen Motortyp. Zur Positionssteuerung sind zusätzlich ein Winkelencoder und eine Steuerung notwendig. Durch diese Kombination erhält man ein in sich geschlossenes Servo-System, das eine vorgegebene Position selbständig anfahren kann.

Die Steuerung sollte über RS485 oder CAN-Bus angesprochen werden können. Diese Schnittstellen bieten beide eine bidirektionale Kommunikation über eine große Entfernung. Mit RS485 ist eine Leitungslänge bis zu 1200 m möglich, mit CAN-Bus bis zu 500 m. Bei einem Einsatz im Stadion müsste eine Leitungslänge von ca. 350 - 400 m überbrückt werden. Dafür bieten sich beide Busse an. RS485 beschreibt nur die elektrischen Eigenschaften der Schnittstelle, kein Protokoll. Oft werden einfache Steuerbefehle mit ASCII-Kodierung übertragen, was eine Implementierung sehr einfach macht. Im Gegensatz dazu definiert der CAN-Bus ein eigenes Protokoll mit festem Frame-Aufbau. Die Übertragungssicherheit ist sehr hoch, der Preis dafür jedoch ein großer Daten-Overhead. Schnittstellen-Konverter, beispielsweise auf USB sind für RS485 wesentlich preisgünstiger als für den CAN-Bus. Die Priorität bei der Suche lag aufgrund der Vorteile bei RS485.



Eine Reihe verschiedenster Motoren wurde in Betracht gezogen, unter anderem sogar ein Linearmotor, für welchen allerdings eine konstruktive Anpassung notwendig gewesen wäre. Eine Liste der recherchierten Motoren befindet sich im Anhang. In der Endauswahl standen zwei Motoren mit ähnlichen Leistungsdaten und einem ähnlichen Preis: der SV2316DT der Firma Servida, ein vollintegrierter bürstenloser Gleichstrommotor mit Encoder und Steuerelektronik als Direktantrieb, und der bürstenlose Gleichstrommotor EC flat 45 mit angebautes Stirnradgetriebe, angebautes Encoder und externer Steuerung. Während der SV2316DT nur ein maximales Drehmoment von 0,85 Nm aufbringen kann, leistet der EC flat 45 mit Getriebe 2,2 Nm.

Beide Motoren konnten am IRT „probegehört“ werden. Beim Servida Motor wurde im Betrieb ein Geräuschpegel von 42dB in einem Abstand von 10cm gemessen. Eine Messung des Maxon-Motors war leider nicht möglich, da während des Vertreterbesuches die Motorsteuerung kaputt ging, noch bevor der Schallpegel gemessen werden konnte. Nach subjektiver Bewertung lagen die Pegel aber in einem ähnlichen Bereich, tendenziell sogar noch etwas niedriger. Allerdings können diese Werte nur eine grobe Richtung weisen, da im Einsatz viele weitere Faktoren die Geräuschemission beeinflussen, z.B. die Drehzahl.

Letztendlich führten mehrere Faktoren zu einer Entscheidung zugunsten des Servida-Motors. Da dieser als Direktantrieb ausgeführt ist, wird kein Getriebe mit hoher Übersetzung benötigt und damit ein Getriebeispiel vermieden, auch ist die Drehzahl und davon abhängig die Geräuschentwicklung niedriger. Das Getriebe des Maxon-Motors erhöht zwar die Positioniergenauigkeit, hat dafür auf der Abtriebsseite aber ein recht hohes Spiel von 1° und muss mit höheren Motordrehzahlen betrieben werden. Die Ansteuerung des Servida-Motors ist durch die verwendete RS485-Schnittstelle wesentlich einfacher als durch die beim Maxon-Motor implementierte CAN-Bus-Schnittstelle. Einer der wichtigsten Gründe war jedoch die sofortige Verfügbarkeit des Servida-Motors, während der Maxon-Motor eine Lieferzeit von ca. 8 Wochen gehabt hätte.

Der gewählte Motor hat in seinem kompakten Gehäuse bereits die Ansteuerung integriert. Über zwei SubD-Stecker können Spannungsversorgung, RS485-Schnittstelle und weitere Ein- und Ausgänge angeschlossen werden. Die Ein- und Ausgänge können individuell entweder als digitale Ein- und Ausgänge oder über integrierte A/D-Wandler als analoge Eingänge verwendet werden. Es wird eine Spannungsversorgung von 24V benötigt, die über ein



externes Schaltnetzteil zur Verfügung gestellt werden muss. Jedem Motor kann eine individuelle Adresse zugeordnet werden, so dass ein gezieltes Ansprechen auch im Bus-Verbund möglich ist. Der Motor kann über die mitgelieferte Bedienoberfläche oder über einen Satz an ASCII-Steuerzeichen angesteuert werden.

Der Motor ist mit einem Gewicht von 600g und einer Kantenlänge von 6cm der kompakteste in seiner Baureihe. Er soll daher für beide Achsen verwendet werden. Das für die gestellten Anforderungen zu geringe Drehmoment soll über eine Zahnriemenuntersetzung ausgeglichen werden. Für die Drehachse werden die Zahnriemenräder so ausgewählt, dass sich eine Untersetzung von 4,8:1 und damit ein Drehmoment auf Abtriebsseite von 4,1Nm ergibt. Die Untersetzung der vertikalen Schwenkachse ergibt ein Verhältnis von 2,4:1 und damit ein Drehmoment von 2Nm. Damit werden die Anforderungen erfüllt.

Der Motor stellt verschiedene Betriebsmodi zur Verfügung. Für die Nachführung sinnvoll ist der Positioniermodus. Hier wird dem Motor eine Position vorgegeben, die er anhand einstellbarer Beschleunigung und Geschwindigkeit selbständig anfährt. Dabei wird ein trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil durchlaufen. Geplant ist, dem Motor alle 40ms die neue Position vorzugeben. Werden Geschwindigkeit und Beschleunigung vorher passend gesetzt, kann der Motor die komplette Zeit zum Anfahren der neuen Position verwenden. Damit ist das zur Bewegung notwendige Drehmoment immer so gering wie möglich und so groß wie nötig.

6.4 Konstruktion

6.4.1 Ansatz

Nachdem nun die Motorabmessungen und die Eigenschaften bekannt sind, kann die Mechanik entsprechend ausgelegt werden. Entgegen dem ersten prinzipiellen Aufbau ist es nicht möglich, den Drehteller direkt mit der Motorachse zu bewegen. Zum einen darf die Achse weder in axialer noch in radialer Richtung stark belastet werden, zum anderen werden die geforderten Drehmomente nicht erreicht. Die Lösung ist daher, in der Grundplatte eine Welle drehbar zu lagern, und auf dieser den Drehteller anzubringen. Die Ankopplung des Motors erfolgt über ein Zahnriemengetriebe mit Untersetzung. Durch das Getriebe ergibt sich im Gegensatz zu einem Direktantrieb auch eine feinere Schrittauflösung.



Der Zahnriemen erlaubt einen kompakteren Aufbau, da der Motor nicht in Verlängerung der Welle angebracht sein muss, sondern parallel dazu befestigt werden kann. Da bei einem Zahnriemen die Kraftübertragung durch Formschluss stattfinden, kommt es praktisch zu einer schlupffreien Bewegungsübertragung. Auch ist die Geräusentwicklung sehr gering. Der Zahnriemen wirkt desweiteren entkoppelnd in Bezug auf Körperschall und dämpft hohe Drehmomentspitzen.

Zunächst war angedacht, einen externen absoluten Winkelaufnehmer auf der Abtriebsseite zu verwenden. Damit könnte das Gerät bereits im Einschaltmoment seine Position feststellen. Durch die Montage auf der Abtriebsseite würde jegliches Getriebeispiel ausgeglichen und die Winkelerfassung wäre so genau wie möglich. Da der nun verwendete Motor aber bereits einen 4000 Schritt Encoder integriert hat und das Zahnriemengetriebe spielfrei ist, lohnen sich die zusätzlichen Kosten und der erhöhte Konstruktionsaufwand für einen externen Encoder nicht mehr. Wird das Gerät unter Einsatzbedingungen im Stadion aufgebaut, ist eine genaue Ausrichtung des Gerätes aufgrund des hohen Statives sowieso nicht so einfach möglich. Es muss also in jedem Fall eine Kalibrierung durchgeführt werden, ein absoluter Winkelaufnehmer könnte also seine Vorteile gar nicht ausspielen.

Die Konstruktion erfolgte mithilfe des CAD-Systems CoCreate der Firma PTC. Eine etwas eingeschränkte Version, deren Funktionsumfang für dieses Projekt aber ausreicht, gibt es als Freeware. Zunächst wurden die Bauteile dimensioniert, modelliert und zusammengebaut. Für manche der eingekauften Teile, wie Kugellager und Zahnriemenscheiben, gab es bereits fertige 3D-Daten, die nur importiert werden mussten. So entstand der Remote-Head zunächst als Modell. Von jedem Bauteil wurde anschließend eine bemaßte Zeichnung erstellt, anhand derer in der Werkstatt des IRT das Teil angefertigt wurde. Die Zeichnungen befinden sich im Anhang. Der Zusammenbau und notwendige Anpassungen erfolgten ebenfalls in der Werkstatt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Baugruppen im Detail eingegangen.

6.4.2 Grundkonstruktion

Der Grundaufbau des Gerätes besteht aus einer 8mm starken Alu-Platte, die den Drehteller, den Antrieb der Drehachse, das Gehäuse und die Befestigung für das Stativ trägt. Mittig ist ein Kugellager eingebracht, in dem eine Hohlwelle läuft. Ein zweites Lager befindet sich in



einem unten an der Grundplatte angebrachten Bock. Durch diese zwei Lager ist die Welle axial fixiert und lässt sich geräuschlos drehen.

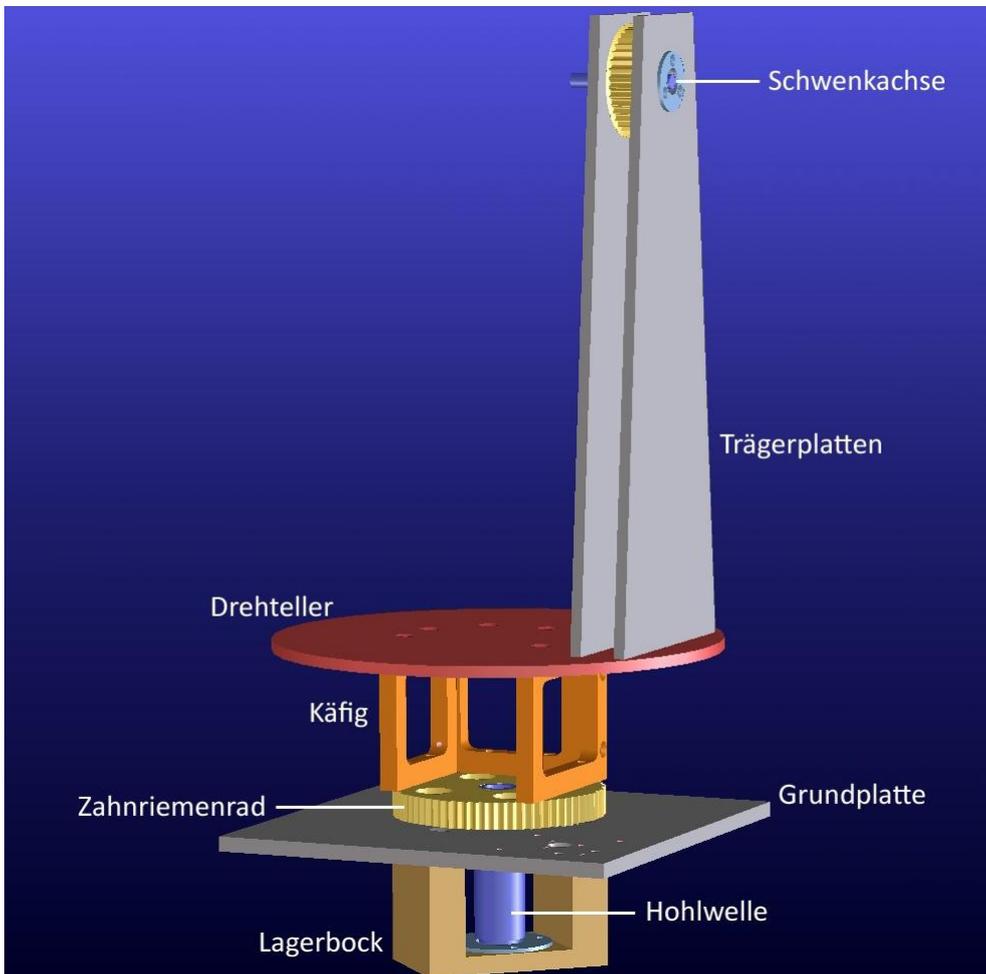


Abbildung 13 - CAD-Ansicht der Grundkonstruktion

Alle verwendeten Kugellager sind Rillenkugellager, da diese besonders geräuscharm laufen und sowohl axiale als auch radiale Kräfte aufnehmen können. Da die Welle als Hohlwelle ausgeführt ist, können später die Kabel für den Schwenkmotor und das Mikrofon durch die Drehachse geführt werden. Da die Kabel recht lang sind, wird damit eine mehrfache Umdrehung des Drehtellers möglich, ohne die Kabel zu stark zu belasten.

Auf dem oberen Wellenende, das aus der Grundplatte herausragt, ist ein Zahnriemenrad aufgesetzt, die durch Verstiften spielfrei verbunden ist. Das Zahnriemenrad trägt eine Art Käfig, der so ausgelegt ist, dass eine möglichst steife Verbindung zum Drehteller besteht.



Innerhalb des Käfigs ist Platz für den Motor der Neigeachse. Auf dem Drehteller werden seitlich zwei Trägerplatten angebracht, in denen die Schwenkachse gelagert ist.

6.4.3 Antrieb Drehachse

Wie in Abbildung illustriert, wird die Baugruppe für den Antrieb des Drehtellers ebenfalls an der Grundplatte angebracht. Der Motor selbst wird zum Zweck der Körperschallentkopplung über vier Metall-Gummipuffer angebaut. Diese bestehen aus zwei kleinen Stahlplatten mit Gewinde, die über ein Kautschuk-Element miteinander verbunden sind. Dadurch sind die Puffer sowohl für Schub- als auch für Druckbeanspruchung elastisch.

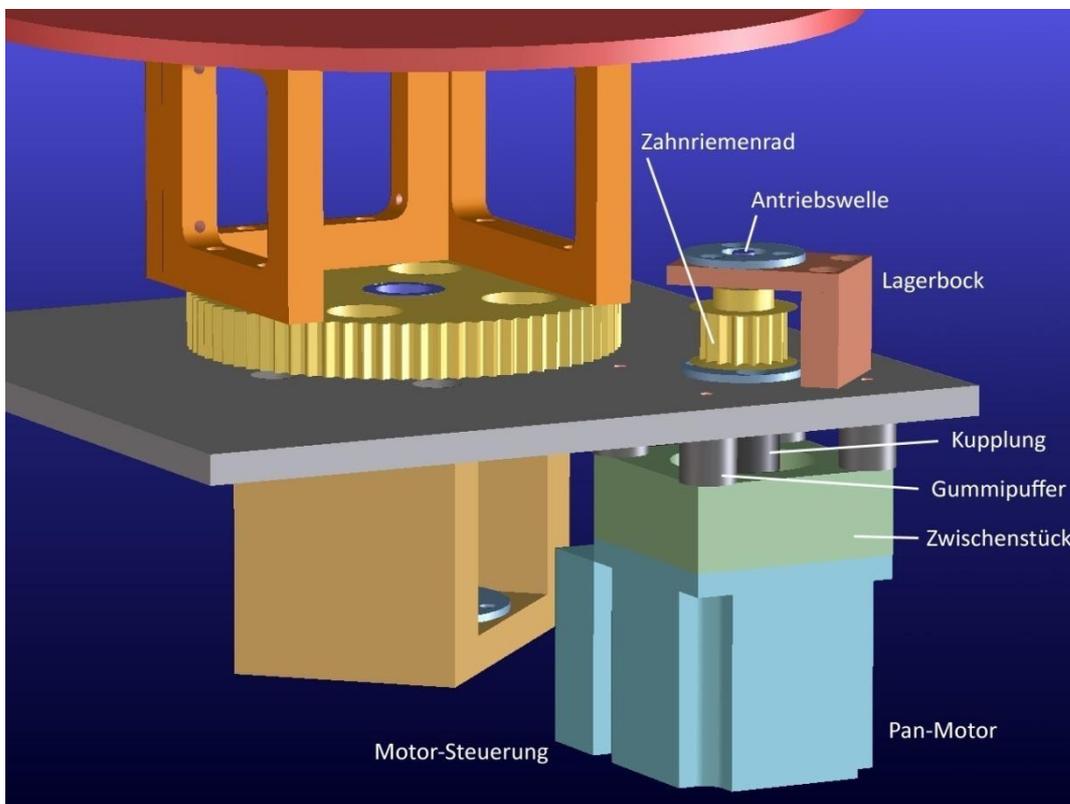


Abbildung 14 - CAD-Ansicht der Dreheinheit

Die Motorwelle wird mit der Antriebswelle über eine Kupplung verbunden. Bedingt durch deren Länge muss der Motor etwas nach unten versetzt werden. Dies geschieht über ein Zwischenstück aus Aluminium. Gewählt wurde eine drehstarre Kupplung mit einem Übertragungselement aus Kunststoff, das durch seine dämpfende Eigenschaft ebenfalls die



Körperschallübertragung dämpfen soll. Außerdem gleicht die Kupplung einen relativ großen radialen Versatz aus, wie er unter Umständen durch die Gummipuffer entstehen könnte.

Die Antriebswelle ist ebenfalls wieder zweifach gelagert, einmal in der Grundplatte und über ein zweites Kugellager in einem auf der Grundplatte angebrachten Lagerbock. Die Antriebswelle trägt ein kleines Zahnriemenrad, das wieder mit der Welle verstiftet und damit absolut spielfrei ist.

Die beiden Zahnriemenräder werden nun über einen Zahnriemen verbunden. Es ergibt sich eine Untersetzung der Drehgeschwindigkeit von 1:4,8. Gleichzeitig wird das Drehmoment um eben diesen Faktor verstärkt. Die Auslegung des Zahnriemens erfolgt über ein Berechnungs-Tool der Firma Mäder.

6.4.4 Antrieb Schwenkachse

Kritisch bei der Planung der Schwenkachse war die Positionierung des Motors. Da dieser eine nicht zu vernachlässigende Masse hat, sollte er sich möglichst im Drehpunkt befinden und von dort die Schwenkachse, die sich am Rand des Tellers befindet, antreiben. Dies wird

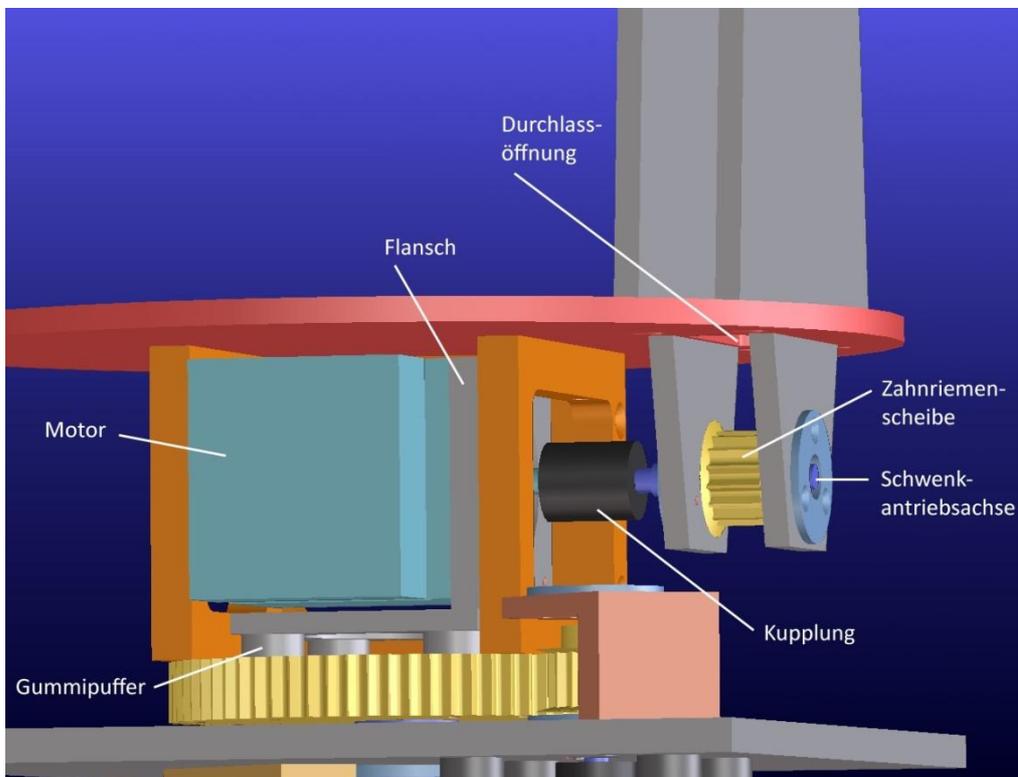


Abbildung 15 - CAD-Ansicht der Schwenkeinheit



erreicht, indem wie bereits beschrieben der Drehteller über einen „Käfig“ mit der Zahnriemenscheibe und damit der Drehwelle verbunden wird. In diesem „Käfig“ sitzt der Motor für die Schwenkachse. Der Motor ist an einen Winkel angeflanscht, der wiederum über vier Metall-Gummipuffer an das Zahnriemenrad angeschraubt ist. Die Puffer sind durch Ausfräsungen im Zahnriemenrad versenkt, um Bauhöhe zu sparen.

In paralleler Weise zum Drehantrieb wird auch hier das Drehmoment über eine Kupplung des gleichen Typs auf die Schwenkantriebsachse übertragen, die wiederum mit der Zahnriemenscheibe über Stifte verbunden ist. Von dort läuft der Zahnriemen nach oben zur Schwenkachse. Im Drehteller ist dafür eine Durchlassöffnung ausgefräst, die gerade so groß ist, dass der Zahnriemen durchlaufen kann.

Die folgende Abbildung zeigt die Umsetzung der beiden Achsantriebe beim Prototypen:

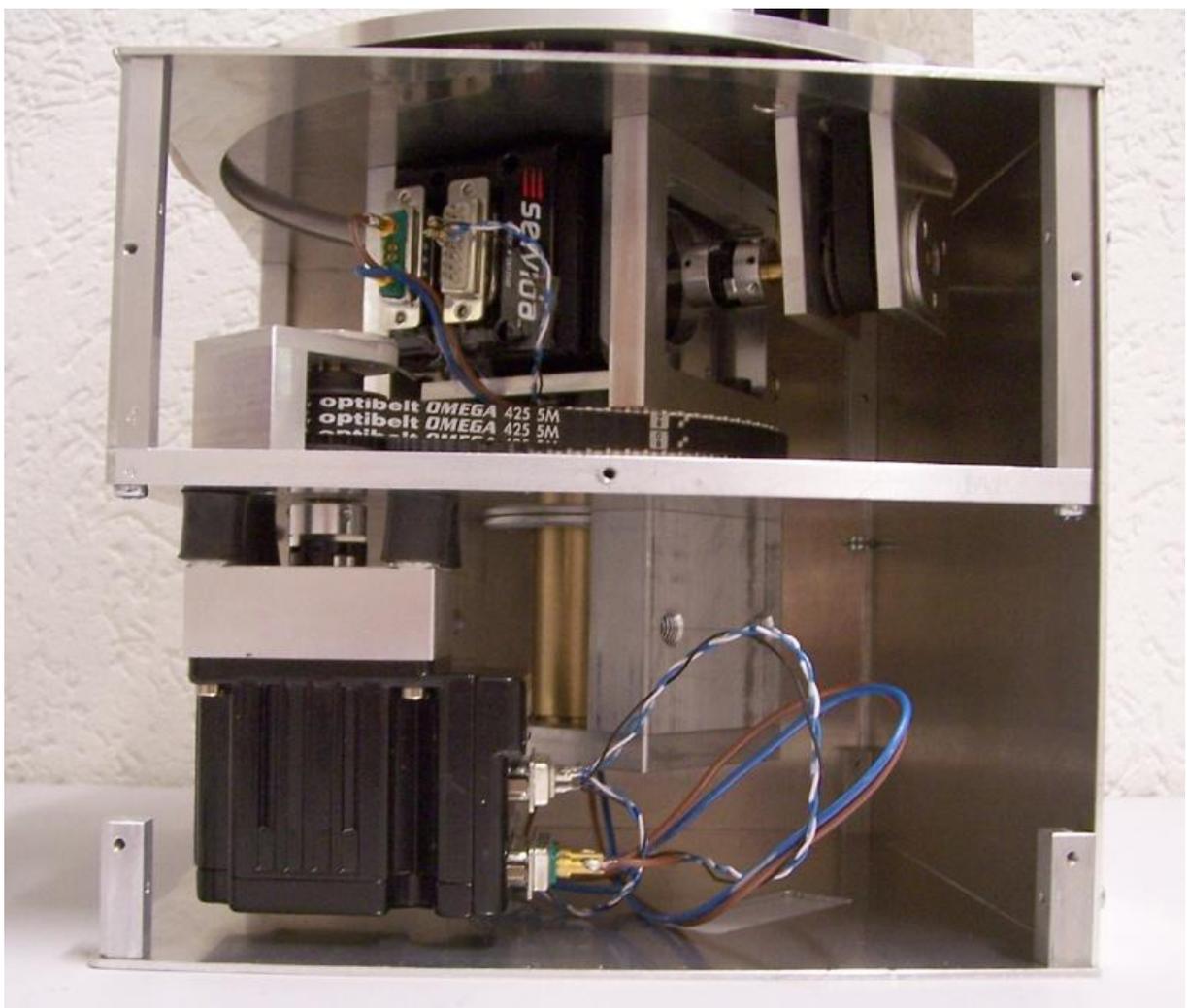


Abbildung 16 - Aufbau der Antriebseinheiten des Remote-Heads



6.4.5 Mikrofonhalterung

Entgegen dem ersten Ansatz wird die Mikrofonhalterung nicht mehr auf zwei Seiten durch jeweils eine Trägerplatte gelagert. Stattdessen werden die beiden Trägerplatten auf eine Seite gesetzt. Damit wird die durch mechanische Komponenten verursachte Abschattung auf das Mikrofon verringert. Außerdem sinkt der mechanische Aufwand, da dann nur noch eine gelagerte Achse vorhanden ist. Da das Mikrofon mit Windschutz nur ca. 600 g wiegt, ist ausreichend Stabilität gegeben. Der Abstand der Platten ist gerade so groß, dass darin der Zahnriemen laufen kann, der über ein Zahnriemenrad die Schwenkachse bewegt. Die Schwenkachse hat an ihrem Ende einen flachen Zylinder, der mit einer Nut versehen ist. In dieser Nut wird die Mikrofonhalterung befestigt, die dadurch noch in Längsrichtung verschiebbar bleibt. Damit lässt sich die Halterung so einstellen, dass der Drehpunkt des Mikrofons mit dessen Schwerpunkt zusammenfällt. Die Halterung wird durch ein Langloch mit Schrauben fixiert. Die beiden Gummiringe, die das AT895 tragen, sind im Lieferzubehör des Mikrofons enthalten.

Die gesamte Drehvorrichtung ist so hoch angebracht, dass sich das Mikrofon ohne Anschlag frei drehen kann. Für Fußball würde ein Schwenkbereich von 90° ausreichen, um für spätere Anwendungsfälle gerüstet zu sein, wurde der Bereich aber auf 360° erweitert.

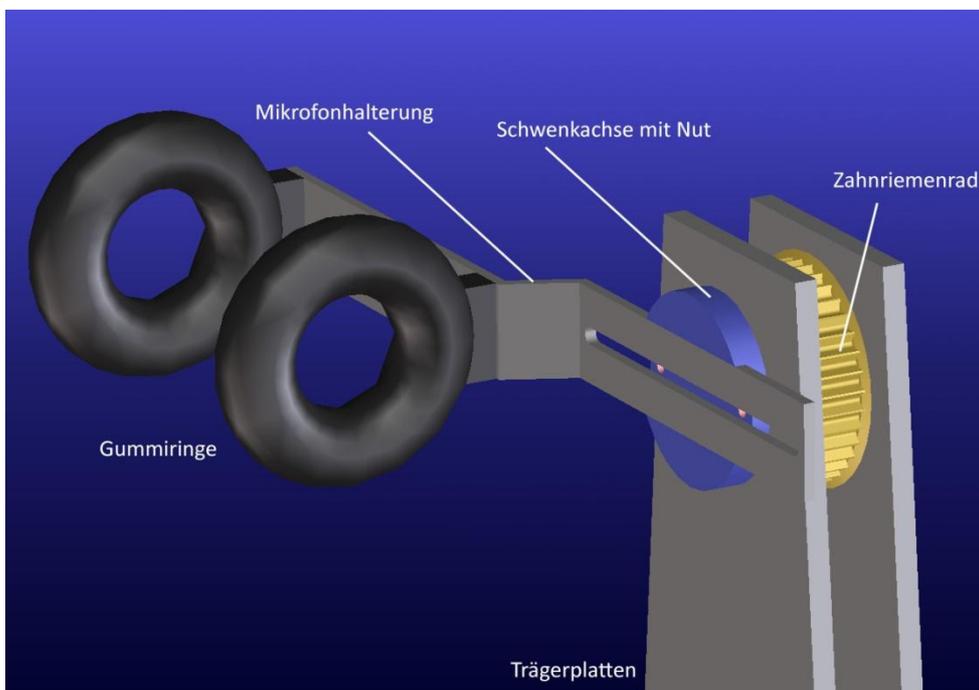


Abbildung 17 - CAD-Ansicht der Mikrofonhalterung



6.4.6 Gehäuse und Stativbefestigung

Um das Gerät für eine Präsentation möglichst schnell fertigzustellen, wurde zunächst ein eher provisorisches, in Bezug auf Schalldämmung noch nicht optimiertes Gehäuse angebaut. Das Gehäuse besteht aus 2mm starken Alu-Blechen, die direkt mit der Grundplatte verschraubt sind. Die obere Platte des Gehäuses befindet sich 5mm unterhalb des Drehtellers und ist mit einer runden Ausfräsung versehen, die groß genug ist, damit sich die Vorrichtung frei drehen lässt.



Wie in Abschnitt 6.6.3 näher erläutert, sollte in einer Optimierungsstufe das Gehäuse von der Grundplatte körperschall-entkoppelt angebracht und stärker gedämmt werden. In das Gehäuse eingebracht ist auch ein Steckverbinder, der die elektrischen Signale im Inneren von außen zugänglich macht. In einem nächsten Schritt könnte man auch den außen liegenden Steckverbinder nach innen versenkt anbringen und mit einer Gummitülle versehen, so dass bei einem Einsatz im Regen die Kontakte vor Spritzwasser geschützt wären.

Eine Abdeckung muss auch zwischen den beiden Trägerplatten angebracht werden. Damit ist zum einen der Zahnriemen vor Nässe geschützt. Zum anderen ergibt sich eine zusätzliche Luftschalldämmung an der akustisch undichten Stelle der Zahnriemen-Durchlassöffnung im Drehteller.

Abbildung 18 - Remote Head Prototyp auf Stativ



Im späteren Einsatz soll das Gerät nicht stehend sondern hängend befestigt werden. Da die Störgeräusche ja vom Gehäuse abgestrahlt werden, ist es sinnvoll, das Mikrofon immer von der Störquelle wegzeigen zu lassen. Durch die seitliche und rückwärtige Unempfindlichkeit des Mikrofons minimiert sich so der Einfluss auf das Nutzsignal.

Für die hängende Montage werden seitlich an den Lagerbock, der die Hohlwelle trägt, zwei Aluplatten angebracht. Durch zwei Ausfräsungen in der Gehäuse-Bodenplatte führen diese aus dem Gehäuse. Dort befinden sich zwei quadratische Ausfräsungen zur Aufhängung.

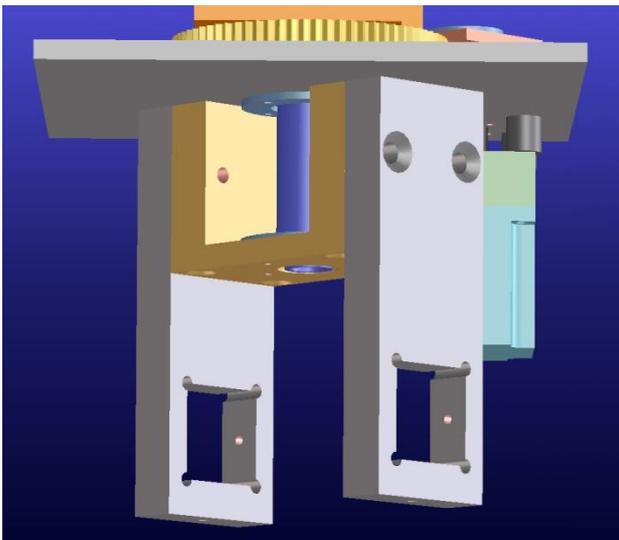


Abbildung 19 - CAD-Ansicht der Stativbefestigung

Um das Gerät mittels dieser Ausfräsungen aufhängen zu können, wurde eine U-förmige Halterung konstruiert, die aus zwei Alu-Vierkantrohren und einer Alu-Flachstange zusammengesweißt ist. Die unten liegende Flachstange wird auf einen Traversenadapter mit dem passenden Stativ-Zapfen geschraubt. Damit kann die Halterung einfach in ein Stativ gesteckt und fixiert werden.

Zur Vervollständigung des Testaufbaus wurde ein Stativ angeschafft. Bei der Auswahl mussten jedoch Kompromisse eingegangen werden. Stative, die für die gewünschte Höhe von 8m ausgelegt sind, sind sehr massiv und schwer und kosten mehrere tausend Euro. Handlichere und preisgünstigere Alternativen gibt es nur für eine geringere Höhe. So wurde als Kompromisslösung ein Kurbel-Stativ für ca. 600 Euro gefunden, das mit einer maximalen Belastbarkeit von 125kg ausreichend stabil und mit 40kg Eigengewicht noch einigermaßen



transportabel ist. Das Stativ kann bis auf 5,30m ausgefahren werden. Zusammen mit dem U-Träger kommt das Mikrofon damit auf eine Höhe von knapp 6m.

6.5 Aktuelle Geräuschemission

Nachdem der erste Prototyp fertiggestellt war, wurden Messungen bezüglich der Geräuschemission durchgeführt. Dabei bestand das Hauptinteresse darin, wie viel Störschall vom verwendeten Mikrofon aufgenommen wird, wenn sich der Remote-Head bewegt. Da das AT895 ja eine starke rückwärtige und seitliche Dämpfung verspricht, müssen die Messungen direkt mit diesem Mikrofontyp durchgeführt werden. Da das Mikrofon fest mit der Vorrichtung verbunden ist, werden so auch die wichtigen Körperschallanteile erfasst.

Die Messungen fanden im reflexionsarmen Raum im IRT statt. Da ein kompletter Aufbau der Vorrichtung mit Stativ aufgrund der Größe nicht möglich war, wurde der Remote-Head ohne Stativ auf eine weiche Oberfläche gestellt, um eine mögliche Körperschallübertragung zu unterbinden. In einem definierten Abstand wurde ein Lautsprecher aufgebaut. Das AT895 war zur Kalibrierung zunächst direkt auf den Lautsprecher ausgerichtet.

Zu Beginn wurde ein rosa Rauschen auf den Lautsprecher gegeben. Über einen kalibrierten Schallpegelmesser wurde der Schallpegel am Ort des AT895 auf einen definierten Wert von 80dB gebracht. Das für die Messung verwendete Messgerät, ein Acoustilyzer der Firma NTI, besitzt einen Eingang für ein externes Mikrofon. Hier wurde das AT895 angeschlossen. Um die Empfindlichkeit des Mikrofons automatisch zu ermitteln, wurde im Messgerät der eingestellte definierte Schallpegel am Ort des Mikrofons eingegeben. Das vom AT895 empfangene elektrische Signal war aber laut einer entsprechenden Fehlermitteilung des Acoustilyzers zu hoch. Offenbar besitzt das AT895 eine Verstärkung für von vorne einfallenden Direktschall und simuliert damit eine sehr hohe Empfindlichkeit, die vom Acoustilyzer nicht mehr verarbeitet werden kann. Als „Workaround“ für dieses Problem wurde im Messgerät ein um 5dB höherer Schallpegel angegeben als tatsächlich herrschte und vom Messergebnis diese 5dB wieder abgezogen. Damit war eine Messung nun möglich. Die Schallquelle wurde daraufhin abgeschaltet und der Remote-Head frei in alle Richtungen bewegt. Die Bewegungsabläufe waren möglichst extrem um möglichst hohe Störgeräusche zu provozieren. Im wirklichen Einsatz werden solche extremen Bewegungsabläufe nie erreicht.



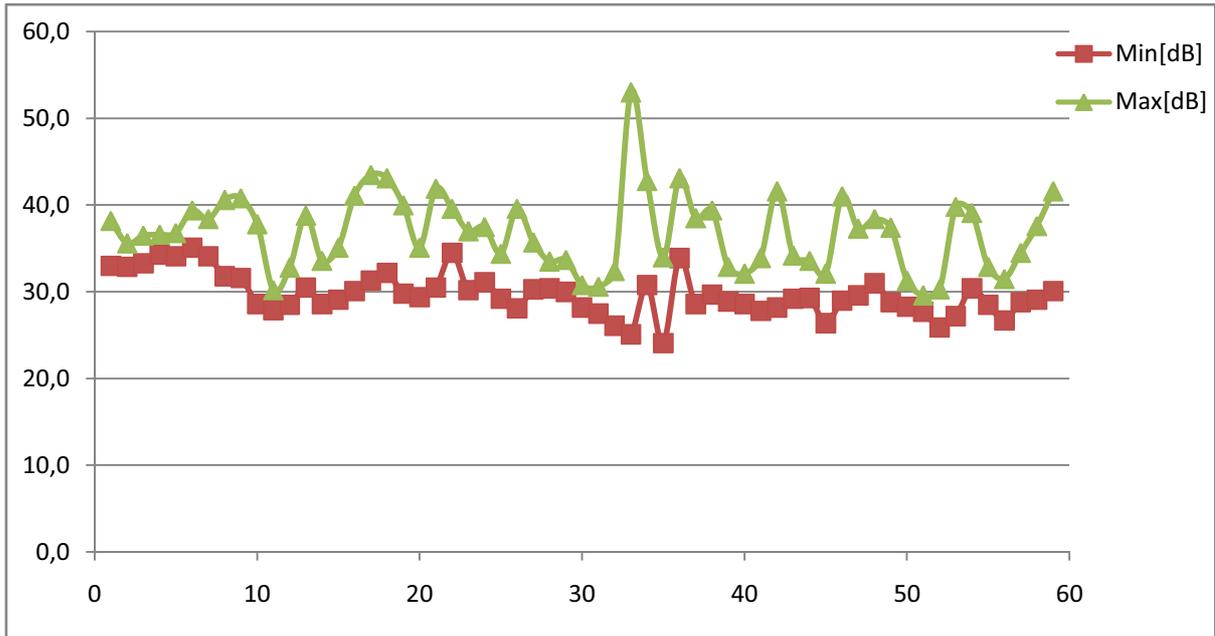


Abbildung 20- Messung der Geräuschemission des Remote-Heads

Der Acoustilyzer lieferte eine Kurve des A-bewerteten SPL-Verlaufs über einen Zeitraum von 60s mit einer Auflösung von 1s. Die maximalen und minimalen gemessenen Werte innerhalb des Zeitraumes von 1s wurden ebenfalls ausgegeben und werden in Abbildung 20 dargestellt. Die minimalen Werte befinden sich meist im Bereich des von Holderer gemessenen A-bewerteten Ersatzgeräuschpegels des AT895. Die maximalen Werte geben die kurzzeitigen Spitzenwerte des Störgeräusches an. Eine Besonderheit stellt die Spitze in Sekunde 34 dar. Hier stieß das Mikrofonkabel an das Gehäuse und verursachte diesen relativ hohen Störpegel. Abgesehen von diesem Ereignis liegt die maximale Spitze des Störpegels innerhalb 60s bei 43,5dB. Der Durchschnitt über 60s liegt bei 33,8dB.

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass die übertragenen Störgeräusche weit unterhalb des vom Publikum verursachten Störschalls im Stadion liegen. Allerdings müssen die Messwerte mit einer gewissen Vorsicht betrachtet werden. Das AT895 arbeitet mit „adaptiven“ Algorithmen, was auch schon zu Problemen bei der Messung der Richtcharakteristik geführt hat. Möglicherweise wird die Unterdrückung des seitlich einfallenden Schalls erst bei zusätzlichem Schalleinfall aus der Haupteinfallrichtung effektiv.

Um einen weiteren Anhaltspunkt für die Geräuscentwicklung des Remote-Heads zu haben, wurde zusätzlich der Pegel des abgestrahlten Luftschalls mit einem Messmikrofon ermittelt. Dazu wurde das Messmikrofon einmal in einem Abstand von 10cm über dem Drehteller



platziert und die Vorrichtung wieder so dynamisch wie möglich bewegt. Der Pegel befand sich hier in einem Bereich von 35 bis maximal 46dB. Auf Höhe des AT895 war noch ein Pegel im Bereich von 29 bis 41 dB messbar.

Da sich der Bearbeitungszeitraum für diese Arbeit schon dem Ende neigte, waren leider keine weiterführenden Untersuchungen, wie beispielsweise Spektralanalyse und subjektive Auswirkungen der Bewegungsgeräusche mehr möglich.

Die Ergebnisse zeigen jedoch tendenziell, dass ein Einsatz im lärmgefüllten Stadion mit dem jetzigen Stand der Entwicklung schon möglich wäre. Trotzdem gibt es noch ein paar Ideen, wie man die Geräuschemission weiter senken kann.

6.6 Maßnahmen zur Geräuschkürzung

Die Vorgänge bei der Körperschallübertragung und Luftschallabstrahlung sind aufgrund der vielschichtigen physikalischen Abhängigkeiten in einer Maschine sehr komplex. Es ist im Prinzip möglich, über Modellvorstellungen zumindest näherungsweise die Vorgänge zu berechnen und zu simulieren. Jedoch ist eine numerische Simulation des Körperschallfeldes einer Maschine anhand beispielsweise der Finite Elemente Methode zur Bestimmung von Körperschallmaß und Abstrahlgrad eine sehr komplexe Angelegenheit, deren Aufwand für dieses Projekt in keiner Relation zum Nutzen stehen würde.

Praktikabel ist eher die sukzessive experimentelle Vorgehensweise über mehrere Optimierungsdurchgänge bis zum Erreichen des vorgegebenen Geräuschpegels. Das heißt, zunächst wird ein Prototyp gebaut, der bereits erste grundlegende Maßnahmen zur Vermeidung von Körperschall beinhaltet. Nach der Messung und Analyse des noch vorhandenen Störpegels und dessen Spektrum werden dann schrittweise weitere Maßnahmen und Messungen durchgeführt, bis ein akzeptabler Störschallpegel erreicht ist.

Bereits bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, dass die Motoren, die ja die Erregerkräfte erzeugen, so gut wie möglich von den tragenden Teilen abgekoppelt sind. Dies wurde zum einen über Gummipuffer an den Befestigungsstellen bewerkstelligt, zum anderen durch den schwingungsdämpfenden Zahnriemen, der die Kraft des Motors zur gewünschten Stelle überträgt. Damit wird im Gegensatz zu einer starren Befestigung die Übertragung der im Motor erzeugten Vibrationen zu einem großen Teil reduziert.



Es ist nicht möglich, die Abstrahlung von Schall komplett zu vermeiden. Deshalb muss ein Ziel für den maximalen Pegel vorgegeben werden, der noch möglich sein darf, ohne die Funktion zu beeinträchtigen. Ideal wäre natürlich, wenn die Geräusche im Eigenrauschen des Mikrofons untergehen würden und damit überhaupt nicht mehr wahrnehmbar wären. Da der Ersatzgeräuschpegel mit 28db(A) sehr hoch ist und das Mikrofon Schall von der Seite und von hinten stark gedämpft aufnimmt, ist dieses Ziel realistisch.

Die wahrnehmbaren Störgeräusche können ihren Ursprung zum einen in der Wandlung des direkt übertragenen Körperschalls zum Mikrofon, zum anderen in der Aufnahme des vom Gehäuse abgestrahlten Luftschalles haben. Der Ursprung beider Schallarten liegt in der dynamischen Krafteinleitung durch die Motoren. Der dadurch entstehende Körperschall breitet sich auf die gesamte Maschine aus und erreicht damit auch das Mikrofon. Eine in diesem Zusammenhang charakteristische Größe ist das Körperschallmaß. Alle vom Körperschall durchsetzten Teile, vor allem die Gehäusewände werden durch die Schwingungen zur Abstrahlung von Luftschall angeregt. Ein Maß für die Umsetzung von Körperschall in Luftschall ist das Abstrahlmaß.¹⁴

Zur Optimierung ergeben sich dadurch drei Stellen, an denen angesetzt werden kann: Erregerkräfte, Körperschallmaß, Abstrahlmaß.

6.6.1 Erregerkräfte

Um dem Ball bei einem Fußballspiel folgen zu können, müssen die Motoren hochdynamisch arbeiten. Es sind also teilweise sehr langsame Bewegungen, dann aber auch wieder sehr schnelle Bewegungen oder starke Beschleunigungen möglich. Je nach Stärke der Beschleunigung bringt der Motor mehr oder weniger Drehmoment auf, das je nach Richtung zu einer Erhöhung oder Verringerung der Rotationsenergie führt. Durch die Drehmomenteinleitung in die Mechanik wird, quasi als Nebeneffekt, auch Körperschall erzeugt.

Die Motorsteuerung stellt jede Menge Parameter zur Verfügung, um die Reaktion des Motors zu kontrollieren. So können zum Anfahren einer bestimmten Position die maximale Beschleunigung und Geschwindigkeit vorgegeben werden. Auch die Parameter des

¹⁴ vgl. Dubbel, H. (2007), S.O 30



eingebauten PID-Reglers lassen sich frei einstellen. Wird die Beschleunigung sehr hoch und der Regler sehr „steif“ eingestellt, so folgt eine sehr akkurate Nachführung mit kleinsten Abweichungen. Allerdings ergeben sich sehr hohe Geräuschpegel. Sind die Parameter zu niedrig, ist das System leise, die Nachführung wird aber „schwammig“, das heißt die Positionen werden nur mit großer Verzögerung erreicht und es entstehen Schwingungen. Es muss durch diese Einstellungen also ein Kompromiss gefunden werden zwischen minimaler Geräuschemission und maximaler Genauigkeit in der Nachführung. Dies kann nur experimentell erfolgen. Theoretisch betrachtet zielt die Optimierung darauf ab, die Amplitude von Impulsspitzen zu vermindern, indem die Dauer der Drehmomenteinleitung erhöht wird.¹⁵

Eine konstruktive Möglichkeit zur Verringerung der Erregerkräfte ist die Verringerung der zu bewegenden Masse. Durch ein kleineres Massenträgheitsmoment sinkt das notwendige Drehmoment unter Beibehaltung der Beschleunigung. So könnten die Zahnriemenscheiben evtl. aus Kunststoff gefertigt oder die Trägerplatten durch Streben ersetzt werden.

6.6.2 Körperschallmaß

Die Reduzierung des Körperschallmaßes zielt auf die Verringerung des Körperschalls auf den abstrahlenden Oberflächen hin. Prinzipiell geschieht dies, indem der Kraftfluss im Maschineninneren auf einen kleinen, möglichst steif gehaltenen Bereich beschränkt und so von den abstrahlenden Außenflächen ferngehalten wird.

In der Konstruktion sind bereits Maßnahmen umgesetzt, die eine Körperschallübertragung vermindern sollen. Dies sind zum einen die Gummipuffer, über die die Motoren befestigt werden. Eine harte Verbindung besteht damit nur noch über die Motorwelle. Aber auch hier wird durch den Einsatz einer Kupplung mit einem dämpfendem Kunststoffzwischenelement versucht, die Körperschallausbreitung einzuschränken. Überdies wirkt auch der Zahnriemen entkoppelnd.

Allerdings besteht eine harte Verbindung zur Grundplatte bzw. zum Drehteller über die Lager der Antriebswellen. Über diese Verbindung könnten sich Körperschallwellen

¹⁵ vgl. Kollmann, F.G. (2006), S. 320 f.



ausbreiten. Eine Entkopplung ist an dieser Stelle aber schwierig, da für eine exakte Zahnriemenführung die Wellen sehr genau gelagert werden müssen. Hier gibt es also keine Möglichkeit für Gummielemente. Eine Optimierungsmöglichkeit wäre die Erhöhung der Masse an der Krafteinleitungsstelle, also der Stelle, an der das Lager sitzt. Damit würde an dieser Stelle die Eingangsimpedanz erhöht.¹⁶

Eine weitere wichtige Maßnahme ist die Aufhängung des Gehäuses an der Grundplatte über Gummipuffer. Es ist konstruktiv möglich, durch eine Befestigung in zwei Ebenen das Gehäuse stabil, aber trotzdem weitestgehend körperschallentkoppelt anzubringen. Der Umbau muss in einer nächsten Optimierungsstufe umgesetzt werden.

6.6.3 Abstrahlmaß

Auf die Gehäuseoberflächen zielt auch eine Reduzierung des Abstrahlmaßes ab. Im „Taschenbuch für den Maschinenbau“ heißt es:

„Biegeschwingungen bzw. Biegewellen an der Maschinenoberfläche sind am stärksten an der Geräuschabstrahlung von Maschinenstrukturen beteiligt. Lärmarme Maschinen erhält man daher durch Vermeidung bzw. Minimierung der Biegewellen an den Maschinengehäusen.“¹⁷

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wird durch eine Reduzierung des Körperschallmaßes die Übertragung von Biegewellen zum Gehäuse minimiert. Ganz lässt sich die Übertragung jedoch nicht vermeiden. Doch lassen sich deren Auswirkung durch die Reduzierung des Abstrahlmaßes verringern.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Biegewellen in einer Platte ist von der Frequenz abhängig, während die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Luft konstant ist. Diejenige Frequenz, bei der die beiden Ausbreitungsgeschwindigkeiten gleich sind, bezeichnet man als Koinzidenzfrequenz¹⁸. Die Abstrahlung der Biegewellen in die Luft verläuft ungemindert, sobald die Frequenz oberhalb der Koinzidenzfrequenz der Platte liegt. Die Koinzidenzfrequenz hängt von der Massenbelegung und der Biegesteifigkeit der Platte ab und kann

¹⁶ Kollmann, F.G. (2006), S. 322

¹⁷ Dubbel, H. (2007), S. O 31

¹⁸ vgl. ebd., S. O 30



angehoben werden, wenn die Massenbelegung erhöht oder die Biegesteifigkeit verringert wird. Das Ziel ist, die Frequenz soweit zu erhöhen, dass möglichst wenig der störenden Schallanteile abgestrahlt werden. Zur Bestimmung der störenden Schallanteile muss deshalb zuerst eine Messung des Spektrums durchgeführt werden. Die Koinzidenzfrequenz lässt sich beispielsweise durch Bekleben der Platten mit Bitumenpappe erhöhen.

6.7 Kalibrierung

Um mit dem System eine genaue Nachführung zu erreichen, ist es notwendig, den Standort und die Ausrichtung der Remote-Heads mit der Software abzustimmen. Nur so können die in der Software berechneten Ausrichtungen korrekt in die reale Welt übertragen werden.

Der erste Schritt ist zunächst, die Position der Remote-Heads in die Software einzutragen. Diese Werte werden als Grundlage für die geometrischen Umrechnungen verwendet. Da der Mittelpunkt des Tores die Spielfeldbreite halbiert, wäre dies ein passender Messpunkt. Von diesem Punkt ausgehend kann der Abstand zur Seite und nach hinten, vorzugsweise mit einem Laserentfernungsmesser, bestimmt werden. Auch die Höhe des Mikrofons lässt sich mit einem solchen Messgerät komfortabel messen. Damit befindet sich das Mikrophon an einem definierten Punkt im Raum.

Nach dem Aufbau kann das Gerät in drei Achsen fehlerhaft ausgerichtet sein:



Abbildung 21 - mögliche Verdrehung des Remote Head



Die fehlerhafte Ausrichtung in u-Richtung lässt sich über die horizontale Drehung kompensieren. Hierzu müsste im Prinzip das Mikrofon direkt auf den Spielfeldmittelpunkt ausgerichtet werden und diese Stellung als 0° markiert werden. Da jedoch das Mikrofon in einer Höhe von mehreren Metern rein visuell nicht exakt genug ausgerichtet werden kann, muss eine genauere Methode verwendet werden. Denkbar ist hier die Anbringung eines Laserpointers an der Mikrofonhalterung, parallel zur Mikrofonachse, jedoch nach hinten ausgerichtet. Wird das Mikrofon entsprechend geschwenkt, kann der ausgesendete Laserstrahl durch Bewegen des Pan-Motors parallel zur Torlinie ausgerichtet werden. Die praktische Vorgehensweise wäre, den aufkommenden Punkt so zu positionieren, dass er den gleichen Abstand zur Torlinie hat wie das Mikrofon. Damit hat man eine Richtung definiert, die senkrecht zur 0° -Richtung der Pan-Achse steht.

Die v-Achse lässt sich komplett automatisiert kalibrieren. Dazu ist an der Mikrofonhalterung ein kleiner Neigungssensor anzubringen. Der vorgesehene Sensor findet in einem IC mit einer Größe von 8mm x 11mm x 12mm Platz. Der Sensor kann entsprechend einer elektronischen Wasserwaage eine Neigung von $\pm 90^\circ$ in Bezug zur Waagrechten in eine Spannung zwischen 0,5 und 4,5 V umwandeln. Diese Spannung kann von einem der analogen Eingänge des Motors erfasst, A/D-gewandelt und über die RS485 Schnittstelle vom Steuerrechner ausgelesen werden. Über eine entsprechende Softwarefunktion kann die Schwenkachse auf diese Weise „ins Wasser“ gebracht werden. Eine exakte waagrechte Ausrichtung entspricht einem Schwenkwinkel von 0° .

Um auch die w-Achse einzurichten, muss das Mikrofon um 90° gedreht werden. In dieser Position erfolgt der gleiche Vorgang wie beim Einrichten der v-Achse. Um das Mikrofon waagrecht auszurichten, muss der Tilt-Motor nun einen anderen Wert anfahren, um das Mikrofon waagrecht auszurichten, als bei einem Pan-Wert von 0° . Die entsprechende Umrechnung für alle Zwischen-Positionen muss die Software übernehmen.

Damit sind nun alle Freiheitsgrade definiert und das Gerät für den Einsatz vorbereitet.



7. Signal- und Versorgungsleitungen

7.1 Steuersignale

Die Übertragung der Steuerdaten für die Motoren im RS485-Standard setzt die Verwendung von geschirmten Twisted-Pair-Leitungen voraus. Nur mit einem für hohe Datenraten geeigneten Kabel mit 110 Ohm Wellenwiderstand sind die großen Entfernungen zu überbrücken. Es wird ein für AES/EBU geeignetes Multicorekabel verwendet. Der Vorteil ist, dass auch die Audiosignale, egal ob analog oder digital über dieses Kabel übertragen werden können. Der Verkabelungsaufwand sinkt dadurch.

Verwendet wird eine Bus-Topologie mit Stichleitungen. Beginnend beim Steuerrechner wird die Leitung über den Standort des ersten Remote-Heads bis zum zweiten Remote-Head gezogen. Falls noch weitere Remote-Heads verwendet werden, wird das Kabel einfach weitergeführt. Geplant ist, dass am Fuß jedes Remote-Head-Stativs ein kleines Rack steht. Im Rack befindet sich eine Verteilerbox, an die das Multicorekabel angeschlossen wird. Von hier aus führt ein Kombi-Kabel nach oben zum Remote-Head. Das Kombi-Kabel umfasst zwei Twisted-Pair-Leitungen für das Datensignal und das Mikrofonsignal und eine Netzzuleitung, die die 24V-Spannungversorgung führt. Am Gehäuse wird das Kabel über einen Mischkontaktstecker angeschlossen, der zwei Hochstrom-Kontakte für die Spannungsversorgung und mehrere Signalkontakte in einem SubD-Stecker vereint. Im Gehäuse führt das Daten-Leitungspaar zunächst zum Drehmotor und dann weiter durch die Hohlwelle zum Schwenkmotor. Geeignete Terminierungswiderstände müssen am Anfang und am Ende des Busses eingefügt werden.

7.2 Audiosignale

Hier stellt sich die Frage, ob die Signale analog oder digital übertragen werden sollen. Bei einer analogen Übertragung muss lediglich das Ausgangssignal des AT895-Signalprozessors über das Kombi-Kabel zum Multicore und von dort zum Audio-Interface beim Steuerrechner geführt werden.

Eine digitale Signalübertragung hätte den Vorteil, dass keine Verluste auftreten, die zu Signaleinbußen führen können. Allerdings muss dazu das Signal bereits am Mikrofonstandort



digitalisiert werden. Die A/D-Wandler müssten dazu synchronisiert werden. Es wäre also eine weitere Leitung für das Wordclock-Signal notwendig.

Zunächst ist vorgesehen, das System mit analoger Signalübertragung aufzubauen. Da die Leitungen für digitale Signale ausgelegt sind, könnte ein A/D-Wandler einfach nachträglich in das Rack am Fuß des Stativs hinzugefügt werden.

7.3 Stromversorgung

Zur Stromversorgung des Remote-Heads wird ein industrielles Standard-Schaltnetzteil mit einer Ausgangsspannung von 24V und einem maximalen Strom von 6A verwendet. Um den Remote-Head so leicht wie möglich zu machen, befindet sich das Netzteil im Rack am Fuß des Stativs. Ein weiterer Vorteil ist, dass oben im Gerät nicht mit Netzspannung hantiert werden muss und dadurch keine Einstreuungen auf Daten- oder Audioleitungen zu befürchten sind. Netzanschlüsse mit 230V sind im Stadion normalerweise vorhanden, notfalls muss ein Verlängerungskabel verwendet werden.

8. Software

8.1 Wahl der Programmiersprache

Von Beginn an war es geplant, die Software modular aufzubauen. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht in der Möglichkeit, im Nachhinein zusätzliche Eingangsmodule zu programmieren und diese über eine definierte Schnittstelle an die übrige Software problemlos anbinden zu können. Zur Umsetzung bietet sich deshalb eine objektorientierte Programmiersprache an.

Exotischere Sprachen sollten bei der Auswahl nicht in Betracht gezogen werden. Treten Probleme bei der Umsetzung auf, so gibt es hier weniger Unterstützung durch z.B. Internetressourcen. Auch war es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, eine Sprache komplett neu zu erlernen. Die Auswahl reduzierte sich deshalb auf C++ und Java.



Wichtige Anforderungen waren eine einfache Thread-Programmierung, eine einfache Möglichkeit der Erstellung von graphischen Benutzeroberflächen und eine einfache Ansteuerung der seriellen Schnittstelle und der Ethernet-Schnittstelle. Durch die mächtigen Klassenbibliotheken von Java sind Oberflächenprogrammierung, Threads und Socketzugriff bereits mit „Bordmitteln“ verfügbar. Für die serielle Schnittstelle kann eine bewährte externe Bibliothek eingebunden werden. In C++ sind für alle angesprochenen Anforderungen bis auf die Socket-Programmierung externe Bibliotheken notwendig.

Java vereinfacht die Programmierung gegenüber C++ durch eine automatisierte Speicherfreigabe und durch das Fehlen von Zeigern, was natürlich auch die Mächtigkeit der Sprache einschränkt. Laufzeitfehlern wird durch den Zwang zum „Exception Handling“ vorgebeugt. Die Plattformunabhängigkeit von Java verspricht außerdem Vorteile bei einer eventuellen späteren Portierung auf ein anderes Betriebssystem. Das Vorurteil, dass C++ generell schneller sei als Java stimmt heute nicht mehr. Deshalb wird die Programmierung in Java durchgeführt.

Erst nach der Implementierung haben sich einige Nachteile von Java unter Windows bemerkbar gemacht. Zum einen ergeben sich durch die automatische Garbage Collection der Virtuellen Maschine sporadische Unterbrechungen des Programmablaufs, die von unter einer Millisekunde bis zu mehreren hundert Millisekunden dauern können. Diese Unterbrechungen können durch Optimierung der Garbage Collection verkürzt, aber nie ganz vermieden werden. Ein weiteres Problem ergibt sich durch die Wahl von Windows als Betriebssystem. Wie während der Programmierung deutlich wurde, stellt das Betriebssystem dem Java Timer nur eine zeitliche Auflösung von 10ms zur Verfügung. Da innerhalb eines Zeitfensters von 40ms Befehle an mehrere Motoren gesendet und Antworten empfangen werden müssen, ist eine exaktere Zeiteinteilung Voraussetzung.

Die hohen Echtzeitanforderungen an die Software wurden zu Beginn unterschätzt. Wie sich jedoch inzwischen gezeigt hat, führen diese zeitlichen Ungenauigkeiten zu einem unruhigen Lauf und führen damit eventuell sogar zu einer höheren Geräuschemission. Eine mögliche Lösung könnte der Einsatz der Java Real-Time Maschine unter einem Echtzeit-Betriebssystem sein. In diesem Fall müsste die Software nur angepasst, nicht neu programmiert werden.



8.2 Konzeption

8.2.1 Aufgaben

Die primäre Aufgabe der Software besteht darin, die Koordinaten des Balles über ein Eingangsmodul einzulesen, daraus die entsprechenden Zielrichtungen für die Schwenk- und Neigeachse der Remote-Heads zu berechnen und deren Motoren entsprechend anzusteuern. Dabei muss gewährleistet werden, dass die Zeit- und Ortsauflösung gering genug ist für eine flüssige Nachführung. Die Verarbeitungszeit der Software muss minimal sein, um den Versatz zwischen realem Ball-Aufenthaltort und dem angesteuerten Ort möglichst gering zu halten.

Der Benutzer soll zudem die Möglichkeit haben, den Prozess zu steuern und ausreichend zu parametrieren. Er soll ein vorhandenes Eingangsmodul auswählen und dessen Parameter einstellen können. Auch eine umfangreiche Steuerung der Nachführung muss möglich sein. So muss der Benutzer jederzeit über aktuelle Statusinformationen der Remote-Heads informiert sein, deren Position auf dem Spielfeld festlegen, sie manuell bewegen und eine Kalibrierung durchführen können. Zudem muss natürlich eine automatische Nachführung gestartet und gestoppt werden können.

Ausführliche Statusinformationen über gelungene und fehlerhafte Vorgänge müssen dem Benutzer zugänglich gemacht werden, um eine zuverlässige Bedienung im Live-Einsatz zu gewährleisten.

8.2.2 Überblick

Diese Vorgaben sollen durch folgenden modularen Ansatz umgesetzt werden:



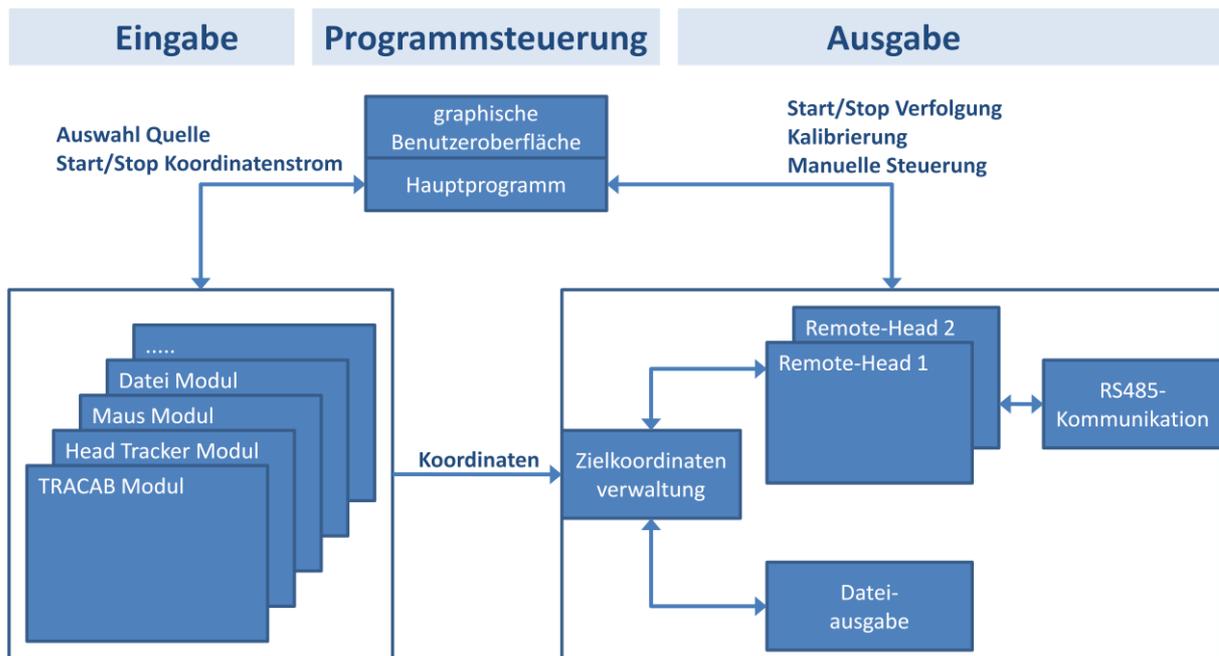


Abbildung 22 - Aufbau der Steuerungssoftware

Die Software ist in ihrem Aufbau in die Bereiche „Eingabe“, „Programmsteuerung“ und „Ausgabe“ unterteilt. Dieser Aufbau entspricht der Modularisierung der Software. Zum „Eingabe“-Bereich zählen alle vorhandenen Eingangsmodule, die über eine definierte Schnittstelle angebunden werden. Die Steuerung der Eingangsmodule erfolgt durch das Hauptprogramm, das auch über die graphische Oberfläche die Befehle des Benutzers annimmt und ihm Statusinformationen zur Verfügung stellt. Auch ist das Hauptprogramm zuständig für die Kontrolle der Ausgangsmodule im „Ausgabe“-Bereich. Hier gibt es ein Modul für die Verwaltung der Zielkoordinaten, für die Kommunikation mit den Motoren über die RS485-Schnittstelle und für das Schreiben des Koordinatenstroms in eine Datei. Außerdem befindet sich hier das Modul für die Steuerung eines Remote-Heads, das für jeden vorhandenen Remote-Head instanziiert werden kann. Dadurch ist deren Anzahl beliebig skalierbar. Das Remote-Head Modul kapselt die Funktionalität zur geometrischen Umrechnung der Koordinaten, zur Kalibrierung und manuellen Steuerung und zur Ansteuerung der Motoren. An dieser Stelle macht es der modulare Aufbau einfach, neue Ausgabemöglichkeiten hinzuzufügen oder beispielsweise ein anderes Bus-System zu verwenden.



8.2.3 Hauptmodul mit graphischer Benutzeroberfläche

Das Hauptmodul stellt den Kern der Software dar. Hier erfolgen die Verknüpfung der Eingangs- und Ausgangsmodule und ihre Steuerung. Besonders die Schnittstelle zu den Eingangsmodulen muss streng definiert werden, damit neue Module problemlos eingebunden werden können. Ein wichtiger Punkt bei der Definition der Schnittstelle ist z.B. das Format der Koordinaten. Innerhalb der Software wird ein eignes Koordinatensystem mit Definitionen für Ursprung, Richtung und Auflösung der Achsen verwendet. Alle von außen kommenden Koordinaten müssen im Eingangsmodul auf dieses Koordinatensystem umgerechnet werden, bevor sie an das nächste Modul weitergegeben werden dürfen.

Die Benutzeroberfläche gibt einen Überblick über die dem Benutzer zur Verfügung stehenden Steuermöglichkeiten:

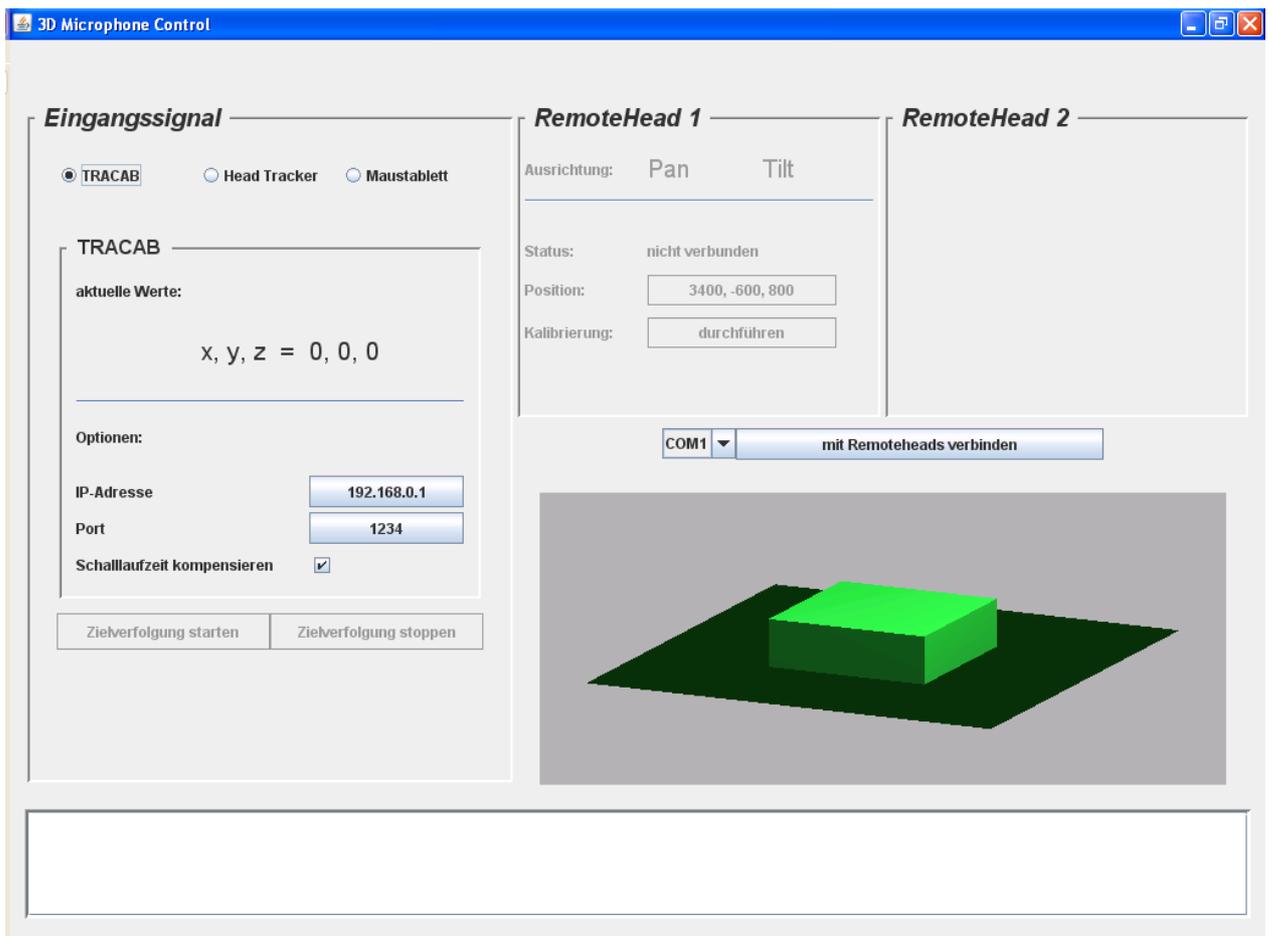


Abbildung 23 - Startbildschirm der Benutzeroberfläche



Im linken Drittel des Bildschirms sind die Optionen in Bezug auf das Eingangssignal untergebracht. Hier kann zunächst das gewünschte Modul über ein Auswahlmü geladen werden. Beispielhaft sind hier die Module für TRACAB, den Head Tracker oder die Maus als Eingangssignal dargestellt. Darunter befindet sich das Optionen-Fenster für das gerade ausgewählte Modul. Im oberen Bereich werden die ankommenden Koordinaten angezeigt, darunter befinden sich je nach Modul verschiedene Einstellmöglichkeiten. Die rechte Seite des Bildschirms ist den Remote-Heads gewidmet. Momentan ist die Darstellung von zwei Exemplaren geplant. Etwa in der Mitte gibt es ein Auswahlmü, in dem die im System vorhandenen seriellen Schnittstellen aufgelistet werden. Hier muss der Port der RS485-Schnittstelle ausgewählt werden. Nach einem Klick auf „mit Remoteheads verbinden“ wird der Port geöffnet und Befehle an die Motoren gesendet. Nur wenn alle Motoren antworten, werden die ausgegrauten Optionen zugänglich und die Verbindung ist hergestellt. Für jeden Remote-Head soll hier die aktuelle Ausrichtung in Winkelgrad dargestellt werden. Mit dem Button „Position“ lässt sich die beim Aufbau des Systems gemessene Position des Remote-Heads auf dem Spielfeld eintragen. Dieser Wert ist die Grundlage für die geometrischen Berechnungen. Unter Kalibrierung erscheint momentan ein Fenster, in dem die beiden Achsen manuell bewegt werden können. Zur Kalibrierung können den eingestellten Winkeln neue Werte zugewiesen werden. Hier soll in Zukunft auch die Option für eine automatische Kalibrierung der Tilt-Achse hinzukommen. Dafür werden die Werte eines Neigungsmessers, wie im Abschnitt 6.7 beschrieben, ausgewertet.

Das in Abbildung 23 rechts unten zu sehende Grafikfenster dient zur Aufnahme einer grafischen Umsetzung der Head Tracker Ausrichtungen. Hier soll sowohl der Ball im 3D-Raum visualisiert werden, als auch die ständige Ausrichtung aller Mikrofone am Spielfeldrand. Im Live-Einsatz besteht so eine bessere Kontrolle über die korrekte Funktionsweise, als das mit den bloßen Zahlenwerten der Winkel möglich wäre.

Das Fenster ganz unten dient zum Anzeigen von Statusmeldungen. Für jede vom Benutzer durchgeführte Aktion gibt es dort eine Rückmeldung über Erfolg oder Misserfolg der Aktion. Damit lassen sich die korrekte Funktionsweise überprüfen und Fehler schnell erkennen.

Die mitunter wichtigste Steuerung befindet sich ganz unten im Fenster des Eingangssignals. Mithilfe der Schaltfläche „Zielverfolgung starten“ werden alle beteiligten Komponenten für die automatische Nachverfolgung aktiviert. Alle empfangenen Koordinaten werden in



diesem Modus direkt in eine entsprechende Bewegung der Remote-Heads umgesetzt. Dies ist der normale Betriebsmodus während des Fußballspiels. Mit der zweiten Schaltfläche lässt sich dieser Modus beenden.

8.2.4 Eingangsmodul „Maussteuerung“

Als die grundlegende und bisher einzige voll funktionsfähige Eingangsdatenquelle dient die Maussteuerung. Sie ist vor allem während der Entwicklung des Systems sinnvoll, wenn noch kein Tracking-System zur Verfügung steht. Auch für Präsentationen eignet sich diese Eingabeform. Für die Maussteuerung wird ein Eingabefenster auf den Bildschirm gezeichnet, das mit der Zeichnung eines Spielfeldes hinterlegt ist. Klickt man in diesen Bereich, wird der Mauszeiger in einen Ball umgewandelt. Bewegt man den Zeiger, werden die x- und y-Koordinaten des Mauszeigers in Koordinaten umgerechnet, die denen an der jeweiligen Position auf dem Fußballfeld entsprechen würden. Diese Koordinaten werden zur Ausgabe gestreamt. Über die Benutzeroberfläche kann anhand der Optionen eingestellt werden, wie oft pro Sekunde die Koordinaten übertragen werden. Wird das Fenster geschlossen, wird gleichzeitig die Zielverfolgung gestoppt.

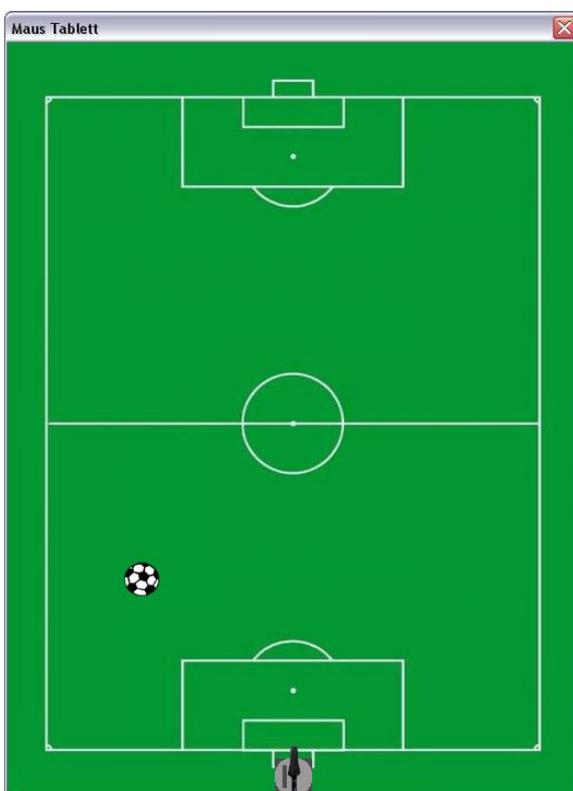


Abbildung 24 - Fenster für das Modul zur Maussteuerung



Auf der Basis dieses Moduls ließe sich auch eine andere Art der Nachverfolgung umsetzen. Wird am Stativ des Remoteheads eine weitwinklige Kamera installiert, so könnte das aufgenommene Videobild als Hintergrund des Fensters verwendet werden. Passt man die Umrechnung der Mausposition an die Geometrie des gezeigten Videobildes an, lässt sich mit der Maus der Ball nachverfolgen und die entsprechenden Ballkoordinaten werden erzeugt. Die Kamera kann auch an einer anderen Stelle im Stadion stehen, ein möglichst hoher Standort wäre dabei von Vorteil.

8.2.5 Eingangsmodul „Head Tracker“

Dieses Eingangsmodul bezieht sich auf den „Patriot“ Head Tracker der Firma Polhemus, der am IRT vorhanden ist und zu Testzwecken verwendet werden konnte. Die wesentlichen Komponenten sind ein Sender, der ständig magnetische Felder erzeugt und ein kleiner kabelgebundener Empfänger, der diese Magnetfelder empfängt und an eine Auswerteeinheit überträgt. Hier erfolgt die Berechnung der Daten und die Übertragung an einen Rechner über die RS232-Schnittstelle.

Der Headtracker liefert die 3D-Position des Empfängers im Bezug zum Sender und seine Verdrehung in allen drei Achsen.

Somit lassen sich zwei Anwendungsfälle umsetzen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung der Positionskoordinaten zur Ausrichtung des Mikrofons auf diesen Punkt. Damit würde das Mikrophon immer den Empfänger, bzw. dessen Träger, verfolgen. Der Bewegungsraum ist allerdings stark eingeschränkt, da die Daten nur zuverlässig sind, wenn Sender und Empfänger nicht weiter als 1m voneinander entfernt sind. Die sinnvollere Möglichkeit wäre die Auswertung der drei Drehachsen und deren Übertragung auf den Remote Head. Damit würde sich das Mikrophon immer synchron zum Empfängerteil des Head Trackers drehen. Als praktische Einsatzmöglichkeit ließe sich das Empfängerteil auf eine Kamera montieren und so deren Schwenks nachvollziehen. Auch wäre es möglich, den Empfänger auf einer Mütze zu befestigen und einen Operator im Stadion anzuleiten, den Ball mit dem Kopf zu verfolgen. Dies könnte funktionieren, wenn eine Pupillenbewegung ausgeschlossen wird, z.B. durch ein Fernrohr. In diesem Falle wäre wieder eine geometrische Umrechnung von der Position des Operators zur Position des Remote Heads notwendig.



8.2.6 Eingangsmodul „TRACAB“

Das bevorzugte Tracking System für den Einsatz im Fußballstadion ist für dieses Projekt, wie in Abschnitt 5.2 dargestellt, das TRACAB Image Tracking System™. Dieses System stellt die Echtzeit-Ballkoordinaten über einen Ethernet-Stream bereit. Als Schnittstelle dazu muss ebenfalls ein Modul programmiert werden. Es nimmt die Koordinaten über eine Socket-Verbindung entgegen, rechnet sie in das eigene Koordinatenformat um und sendet sie zum Ausgabemodul. Die genauen Spezifikationen zum Datenformat sind noch nicht bekannt, deshalb konnte dieses Modul noch nicht umgesetzt werden. Jedoch besteht der Kontakt zu TRACAB bereits, so dass die Informationen in Kürze zur Verfügung stehen werden.

8.2.7 Eingangsmodul „Datei“

Wie in Abschnitt 8.2.11 beschrieben, ist es über das Modul „Datei-Ausgabe“ möglich, den Koordinatenstrom in eine Datei aufzuzeichnen. Das Gegenstück bietet dieses Eingangsmodul. Hier kann eine entsprechende Datei geöffnet und die enthaltenen Daten wieder zur Ausgabe gestreamt werden. Damit lassen sich alle Bewegungen, egal von welchem Eingangsmodul sie kommen, aufgezeichnet und beliebig oft wieder abgespielt werden.

8.2.8 Modul Zielkoordinatenverwaltung

Diesem Modul kommt ein hoher Stellenwert für eine saubere Nachführung zu. Denn aus mehreren Gründen ist es sinnvoll, die empfangenen Koordinaten nicht auf direktem Weg an die Motoren weiterzugeben. So sollten die Positionierungsbefehle an die Motoren in einem festen Intervall gesendet werden, um einen ruhigen Lauf der Motoren zu erreichen. Je nach Eingangsquelle haben die empfangenen Daten aber möglicherweise unterschiedliche Aktualisierungsraten und mehr oder weniger große Jitter-Fehler. Aus diesem Grund sollte das Intervall, in dem die Befehle an den Motor gesendet werden von dem Intervall, in dem die Ballkoordinaten ankommen, abgekoppelt werden.

Ein weiteres Problem, das die direkte Weitergabe der aktuellen Koordinaten verbietet, ist ein physikalisches, nämlich die Schalllaufzeit. Diese kann je nach Ursprung des Schallereignisses auf dem Spielfeld zwischen etwa 20ms und 200ms betragen. Dreht sich das Mikrofon während dieser Zeit weiter dem Ball nach, so kann es sein, dass das Mikrofon in dem



Moment, in dem der Schall ankommt, schon in eine andere Richtung zeigt. Die Stärke der Richtungsabweichung ist proportional zur Ballgeschwindigkeit und beträgt bei der definierten maximalen Ballgeschwindigkeit von 120 km/h etwa $5,7^\circ$. Dieser Wert liegt zwar noch innerhalb des Mikrofon-Akzeptanzwinkels von $\pm 10^\circ$, jedoch gibt es Gründe, diesen Fehler trotzdem auszugleichen. So wird teilweise die vertikale Schwenkachse begrenzt, damit das Mikrofon nicht auf das Publikum zeigt. Daraus ergibt sich bewusst eine Abweichung, die sich unter Umständen zur Abweichung durch die Schalllaufzeit addieren könnte. Auch das Ball-Tracking kann unter Umständen eine nicht zu vernachlässigende Ungenauigkeit mitbringen, vor allem wenn ein nicht so präzises System wie TRACAB verwendet wird. Hier besteht ebenfalls die Gefahr, dass sich die Fehler aufsummieren. Ein weiterer Grund für die Kompensation der Schalllaufzeit ist die Aussage von Audio Technica, dass das Nachfolgemodell des AT895 eine noch engere Richtcharakteristik haben soll. Damit würde die schalllaufzeitbedingte Winkelabweichung dann eventuell auch direkt hörbar. Grundsätzlich ist es immer sinnvoll, vorhersagebare Abweichungen zu kompensieren.

Einen weiteren nicht zu vermeidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Nachführung hat die Latenz des kompletten Systems. Sie entspricht der Differenz zwischen dem Zeitpunkt, zu dem sich der Ball an einem bestimmten Punkt im Spielfeld befindet und dem Zeitpunkt, zu dem das Mikrofon genau auf diesen Punkt zeigt. Diese Zeitdifferenz entsteht durch das Ball-Tracking, das laut TRACAB bis zu 40ms in Anspruch nehmen kann, die Signalverarbeitung in der eigenen Software, die Übertragung der Werte an die Motoren und die Zeit für die mechanische Bewegung auf die neue Position. Durch diese Kette kann durchaus ein Versatz in der Größenordnung von 100ms oder mehr entstehen. Befindet sich der Ball sehr nah am Mikrofon, kann bei einer Latenzzeit von 100ms ein Winkelversatz von 20° auftreten. Damit befindet sich der Ball definitiv außerhalb der Haupteinfallrichtung des Mikrofons.

Aus den Überlegungen ergibt sich, dass das Mikrofon nicht streng den empfangenen Echtzeitkoordinaten des Balles nachgeführt werden darf, sondern ein variabler zeitlicher Versatz eingerechnet werden muss, der Schalllaufzeit und Systemlatenz kompensiert. Zu diesem Zweck wird ein Ring-Puffer eingeführt, der Platz bietet für 100 Koordinaten. Die interne Auflösung wird auf 10ms festgelegt. Gefüllt wird der Ring-Puffer mit den empfangenen Koordinaten des Tracking-Systems. Da dort die zeitliche Auflösung meistens geringer ist, werden die Zwischenwerte interpoliert. Letztendlich ist im Ring-Puffer zu jeder Zeit ein aktueller Positionswert vorhanden und zugleich die vergangenen Ball-Positionen in 10ms



Schritten. Da es zur Kompensation der Systemlatenz auch notwendig ist, die Ballposition schon zu „wissen“, bevor sie empfangen wird, muss eine Bewegungsvorhersage erstellt werden. Dazu ist entweder eine einfach zu berechnenden lineare Vorhersage möglich, oder ein komplexerer Algorithmus, beispielsweise die Anwendung eines Kalman-Filters. Zunächst wurde eine lineare Interpolation implementiert, die die Bewegung zwischen den letzten beiden bekannten Koordinaten in gleicher Richtung und mit gleicher Geschwindigkeit fortsetzt. Ob diese Art der Vorhersage ausreichend ist, hängt unter anderem auch von der Systemlatenz ab, die noch nicht bekannt ist. Hier müssen die weitere Entwicklung und erste Tests abgewartet werden. Prinzipiell lässt sich jedoch sagen, dass bei der Vorhersage immer ein Fehler auftritt, der bei plötzlich auftretenden Bewegungsänderungen maximal wird.

Somit sind im Ring-Puffer nun außer dem aktuellen Positionswert auch eine gewisse Anzahl an Koordinaten aus der Vergangenheit und der Zukunft vorhanden. Für die Nachverfolgung wird nun in einem festen Takt die Differenz zwischen Schalllaufzeit und Systemlatenz berechnet, der entsprechende Wert aus dem Ringpuffer geholt und damit die Motoren angesteuert. Ist die Schalllaufzeit höher als die Latenz, kann auf zuverlässige Werte aus der Vergangenheit zurückgegriffen werden, ist dagegen die Latenz größer, müssen die vorhergesagten Werte verwendet werden.

8.2.9 Modul RS485-Kommunikation

Dieses Modul kapselt die Kommunikation mit den Motoren auf der Transport-Ebene. Es öffnet und schließt die serielle Schnittstelle, sendet die Befehle, die vom Remote-Head Modul kommen und wartet auf Daten, die von den Motoren empfangen werden sollen, bevor es sie an das Remote-Head Modul zurückliefert. Die serielle Schnittstelle wird über die RXTX-Bibliothek angesprochen, die eine schnellere Datenübertragung verspricht als die Standard „Java Communications API“ von Sun.

8.2.10 Modul Remote-Head

Dieses Modul ist von seinen Aufgaben her das umfangreichste. Für jeden Remote-Head kann eine eigene Instanz erzeugt werden. So kann die Software einfach auf mehrere Remote-Heads erweitert werden.



Zum Festlegen der Position des Remote-Heads im Stadion gibt es eine Funktion, die eine Eingabemaske für x-, y- und z-Wert auf den Bildschirm zeichnet. Die hier eingegebenen Werte sind die Grundlage für die Berechnung der Dreh- und Schwenkwinkel.

Eine weitere Funktion, die ebenfalls eine Eingabemaske ausgibt, ist die Funktion zur Kalibrierung der Achsen. Es stehen zwei Schieberegler, einer in horizontaler, einer in vertikaler Ausrichtung zur Verfügung. Wird ein Regler bewegt, so wird an den entsprechenden Motor eine feste Geschwindigkeit übermittelt, die quadratisch steigt, je weiter der Regler bewegt wird. So ist es möglich, die Achse sowohl sehr schnell als auch sehr langsam und exakt zu bewegen. Nachdem die Achse in die gewünschte Position gebracht wurde, lässt sich in einem Eingabefeld der neue Winkel für diese Position angeben. Diese Möglichkeit der manuellen Kalibrierung soll erweitert werden für die automatische Ausrichtung der Tilt-Achse. Hierzu muss über den Motor der Wert des an dieser Achse befestigten Lagesensors ausgelesen und damit die Achse abgeglichen werden.

Für die Hauptbetriebsart, der Nachverfolgung des Balles, verwendet das Modul zwei Funktionen. Mithilfe der ersten Funktion lässt sich der Timer starten und stoppen, der in einem festen Rhythmus die aktuelle Schalllaufzeit aufgrund der Entfernung des Balles bestimmt, mit der vorgegebenen Latenzzeit des Systems aufrechnet und anschließend den entsprechenden Positionswert aus dem Ring-Puffer holt. Diese Koordinaten werden dann an die zweite Funktion übergeben, die für jeden Motor den einzustellenden Winkel ausrechnet, dies in die Motorposition umrechnet und an den Motor überträgt. Für eine flüssigere Bewegung und zur Vermeidung von Geräuschen und Schwingungen wird vor der Übertragung noch der aktuelle Positionswert des jeweiligen Motors ausgelesen, die zu verfahrenende Differenz berechnet und dementsprechend die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Motors gesetzt. So führt der Motor bei kleineren Bewegungen diese mit einer geringeren Schrittgeschwindigkeit aus. Diese ganzen Vorgänge sind sehr zeitkritisch und müssen genau abgestimmt werden, um die Bewegung flüssig, dynamisch und schwingungsfrei zu gestalten. An dieser Stelle ist ein optimaler Status noch nicht erreicht.

Desweiteren sind in diesem Modul noch Funktionen zum Abrufen der Motor-Statusinformationen vorhanden, die auf der Oberfläche angezeigt werden können und weitere Funktionen, wie beispielsweise ein Not-Stop.



8.2.11 Modul Datei-Ausgabe

Eine sinnvolle Erweiterung des Funktionsumfangs ist die Möglichkeit, Bewegungen abzuspeichern und jederzeit wieder abrufen zu können. So soll der Strom der Koordinaten nicht nur in das Remote-Head Modul laufen und dort die Nachführung auslösen, sondern soll auch direkt in eine Datei aufgenommen werden können. Die Organisation hierfür übernimmt das Modul zur Datei-Ausgabe. Es öffnet eine Datei, empfängt die Daten, schreibt diese formatiert in die Datei und schließt die Datei anschließend auch wieder.

Die entstehende Datei kann vom Eingangsmodul „Datei“ (s. Abschnitt 8.2.7) jederzeit geöffnet und der Inhalt immer wieder gestreamt werden.

8.2.12 Aktueller Stand der praktischen Umsetzung

Eine Grundfunktionalität besteht bereits, jedoch befindet sich die Software momentan noch in einem experimentellen Stadium. Die graphische Oberfläche entspricht der momentan möglichen Funktionalität und muss beim Einbinden neuer Funktionen entsprechend erweitert werden. Die Vervollständigung der Dokumentation steht auch noch aus.

Fertig umgesetzt wurde bisher die Kommunikationsschnittstelle mit den Motoren über den RS485-Bus, das Remote-Head Modul, die interne Zielkoordinatenverwaltung mit linearer Bewegungsvorhersage und das Eingangsmodul für die Maussteuerung. Die anderen angesprochenen Module befinden sich noch in der Entwicklung.

Eine Steuerung des Remote-Heads zu Demonstrationszwecken ist bereits möglich.

9. Audiosignalbearbeitung

Die Audiosignalbearbeitung ist ein wesentlicher Bestandteil des Systems. Das Ziel ist, dem Toningenieur im Ü-Wagen einen fertigen Kanal mit Ballgeräuschen anzubieten. Daher muss die Signalbearbeitung bereits vorher durchgeführt werden. Ein großer Vorteil ist, dass im Steuerrechner die Ballkoordinaten bekannt sind und daher die Signalbearbeitung von der Position des Balls abhängig gemacht werden kann.



Ein wesentlicher Bearbeitungsschritt, der auch nach den Testaufnahmen in der Allianz Arena schon durchgeführt wurde, ist die Filterung des Signals. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, müssen die mittleren Frequenzen, in denen die Publikumsgeräusche dominant sind, breitbandig abgesenkt und dafür die Frequenzen um 100Hz und 6kHz leicht angehoben werden. Die genauen Filtereinstellungen müssen – vor allem in Abhängigkeit von den anderen vorhandenen Quellen in der Mischung – erst noch entworfen werden.

Die Verwendung eines Kompressors empfiehlt sich vor allem, um beim Torjubel den Pegel des AT895 gering zu halten. Durch eine hohe Attack-Zeit bleiben die impulsartigen Ballgeräusche während der normalen Spielphase unbeeinflusst.

Der große Vorteil der Ballkoordinaten ergibt sich beim Pegeln der Mikrofone. Hier kann die Automatisierung nun so arbeiten, dass immer nur das Mikrofon offen ist, auf dessen Seite sich der Ball befindet. Im Bereich der Mittellinie wäre ein weiches Überblenden programmierbar, um ein hartes hörbares Umschalten zu vermeiden. Bewegt sich der Ball in der Nähe des Tores, ist es eventuell sinnvoll, den Pegel leicht zu reduzieren um die Gesamtbalance besser zu erhalten. Tendenziell ist es jedoch schon gewünscht, wenn der Ball bei Spielaktionen in Tornähe lauter wird. Hier werden die meisten Emotionen wach und können durch die zusätzliche auditive Komponente unterstützt werden.

Werden vier Mikrofone eingesetzt, so kann die Programmierung dementsprechend abgeändert werden. Das Feld wird dann einfach in vier Bereiche unterteilt.

Falls es sich in der Praxis herausstellt, dass für unterschiedliche Stadien oder unterschiedliche Anzahlen an Zuschauern die Einstellungen abgeändert werden müssen, so wäre eine Speicherfunktion sinnvoll. Damit könnte für jeden Einsatzzweck ein „Preset“ erstellt werden.

Eine weitere wertvolle Funktion könnte eine „Collision Detection“ sein. Diese könnte zwar nicht verhindern, dass ein Ball das Mikrofon oder das Stativ trifft. Da die Koordinaten des Balles jedoch bekannt sind, könnte diese in einem solchen Fall aber dazu verwendet werden, um das Mikrofon rechtzeitig stummzuschalten.



10. Schlussbetrachtung

10.1 Aktueller Projektstand und Ausblick

Die theoretische Auslegung des Systems kann als abgeschlossen gelten. Es wurde versucht, möglichst detailliert und vorausschauend zu planen. Jedoch können sich bei der praktischen Umsetzung immer noch Probleme ergeben, die bei der theoretischen Betrachtung nicht ersichtlich waren. In diesem Fall muss das System angepasst werden.

Zu einem großen Teil ist die praktische Umsetzung bereits durchgeführt worden. Es wurde ein erster Prototyp der Nachführ-Einheit geplant und gebaut, und eine passende Steuersoftware geschrieben. Am Remote-Head sind noch detaillierte Geräuschmessungen und darauf aufbauende Optimierungen notwendig. Der aktuelle Stand der Software wurde im entsprechenden Kapitel beschrieben. Hauptaufgabe ist hier zunächst die Portierung auf ein Echtzeitsystem, damit eine exaktere zeitliche Taktung möglich wird. Der momentane Stand erlaubt die ersten Tests der Mechanik und des Zusammenspiels mit der Software. Als Eingangssignal steht dabei jedoch momentan nur eine manuelle Steuerung zur Verfügung. Der komplett automatisierte Ablauf kann erst nach dem Einbinden des TRACAB-Systems getestet werden. Ein weiterer offener Punkt in der Umsetzung ist die automatische Kalibrierung, die theoretisch bereits vorbereitet ist. Auch die Audio Signalbearbeitung existiert bisher nur in der Theorie. Hier wäre der nächste Schritt die Entwicklung einer passenden Ansteuerung eines Audio-Interfaces durch die Software.

Eine Idee, die während der Entwicklung immer präsent war, aber in diesem Rahmen nicht mehr untergebracht werden konnte, ist die drahtlose Übertragung sowohl der Steuerbefehle als auch der Audiodaten zwischen Steuerrechner und Remote-Heads per W-Lan. Dies würde den Aufbau wesentlich vereinfachen und damit auch Kosten sparen. Die Zuverlässigkeit könnte durch Verwendung von Richtantennen und der Nutzung des 5-GHz Bandes ausreichend hoch sein. Voraussetzung dafür ist die A/D-Wandlung des Audio-Signals direkt am Remote-Heads und eine Wandlung der RS485-Steuerbefehle.



10.2 kritische Reflexion

Kurz nachdem die Testaufnahmen in der Allianz Arena abgeschlossen waren, waren aufgrund einer Tagung die Ton-Verantwortlichen einiger öffentliche-rechtlicher Sender im Haus. Da sich die Gelegenheit bot, wurden ihnen die Aufnahmen vorgespielt und es gab viel positives Feedback. Dies war ein erster Hinweis, dass von Seiten der Sportproduktionen ein Produkt, das auf dem hier entwickelten Ansatz basiert, durchaus auf Interesse stoßen könnte. Dieses Interesse teilte von Anfang an auch der Mikrofonhersteller Audio Technica, der eine wichtige Rolle bei der technischen Ausrüstung von Sportproduktionen spielt.

Gegen Ende der Arbeit konnte der entwickelte Ansatz und der Prototyp des Remote Heads auch auf der AES 2008 in Amsterdam einem Fachpublikum vorgeführt werden. Auch hier war das Feedback wieder überaus positiv, was dem Projekt einen zusätzlichen Motivationsschub verpasst hat. Es ist nun sehr wichtig, so schnell wie möglich erste Praxistests durchzuführen, um die Entwicklung weiter vorantreiben zu können.

Damit aus diesem geplanten Ansatz ein fertig einsatzfähiges Produkt werden kann, ist noch jede Menge Detailarbeit notwendig. Jedoch besteht meiner Meinung nach ein großes Potenzial, dass dieses Projekt der nächste Schritt in der Verbesserung der Tondarstellung bei Sportproduktionen sein kann.



11. Literaturverzeichnis

- Aigner, Alfred (2001): Führt das oftmalige Köpfeln des Balles beim Fußballspiel langfristig zu einer Beeinträchtigung von kognitiven Hirnfunktionen? In: Österreichisches Journal für Sportmedizin. Ausgabe 04/2001, S.6-10
- Audio Technica U.S., Inc. (1999): AT895 Adaptive-array Microphone System - Installation and Operation.
- Baxter, Dennis (2007): A Practical Guide to Television Sound Engineering. Burlington: Focal Press.
- Dubbel, Heinrich (2007): Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Auflage. Berlin: Springer Verlag.
- Fischer, U.; Kilgu, R.; Paetzold, H.; Schilling, K.; Heinzler, M.; Näher, F.; Röhrer, W.; Stephan, A. (1999): Tabellenbuch Metall. 41. Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel.
- Goll, Joachim; Weiß, Cornelia; Müller, Frank (2001): Java als erste Programmiersprache. 3. Auflage. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B. G. Teubner.
- Heidemann Christine (2006): Die Wissenschaft vom Fußball. In: GEO Magazin Nr. 05/06 - Sigmund Freud. Hamburg: Gruner und Jahr
- Holderer, Felix (2007): Voruntersuchungen zur Verbesserung des Tones bei Feldsportarten durch Nachführung von stark richtenden Mikrofonssystemen. Stuttgart: Diplomarbeit an der Hochschule der Medien.
- Kielbassa, Moritz (2008): Das gläserne Spiel. In: Süddeutsche Zeitung vom 23.04.2008
- Kollmann, F.G.; Schösser, Th.F.; Angert, R. (2006): Praktische Maschinenakustik. Berlin: Springer Verlag.
- Kuchling, Horst (2001): Taschenbuch der Physik. 17. Auflage. Leipzig: Fachbuchverlag.
- o. V. (2008): TRACAB in Euro 2008. URL: <http://www.tracab.com/news.asp?id=29>
Abruf: 08.06.2008
- Ziegler, Peter-Michael (2008): Tooor - oder nicht. In: c't 2/2008. Hannover: Heise Zeitschriften Verlag. S. 40



A. Anhang

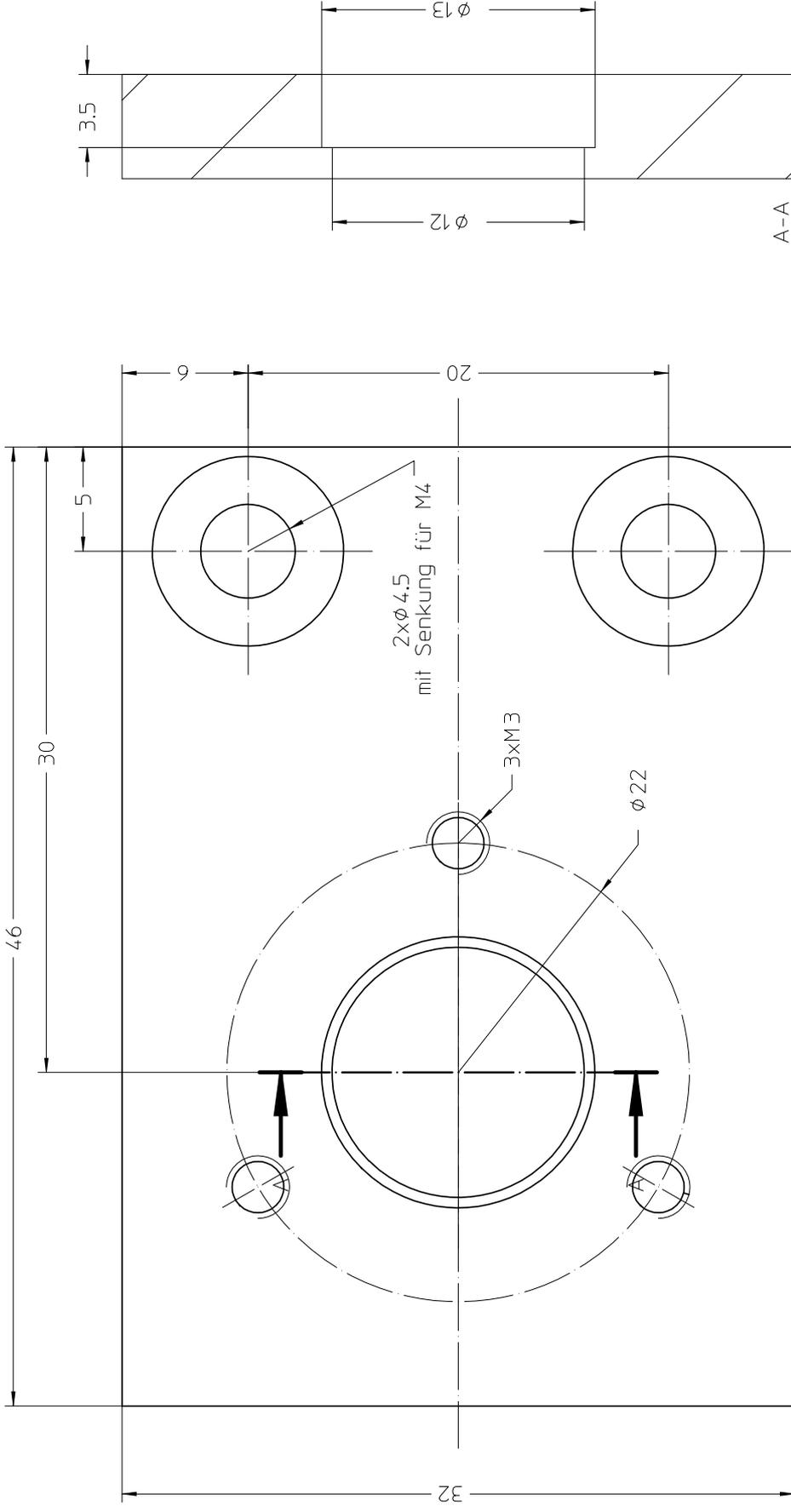
1. Liste der recherchierten Motoren
2. technische Zeichnungen

Zusätzlich auf CD:

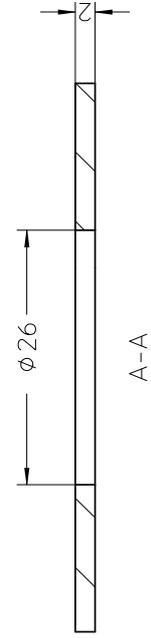
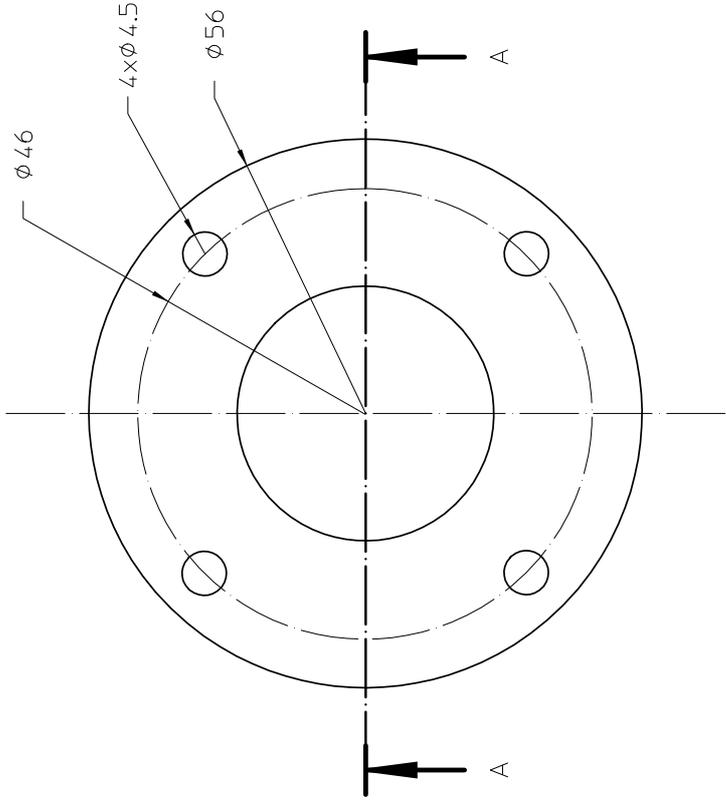
1. Software als Eclipse Projekt
2. Testsequenzen aus den Aufnahmen in der Allianz Arena



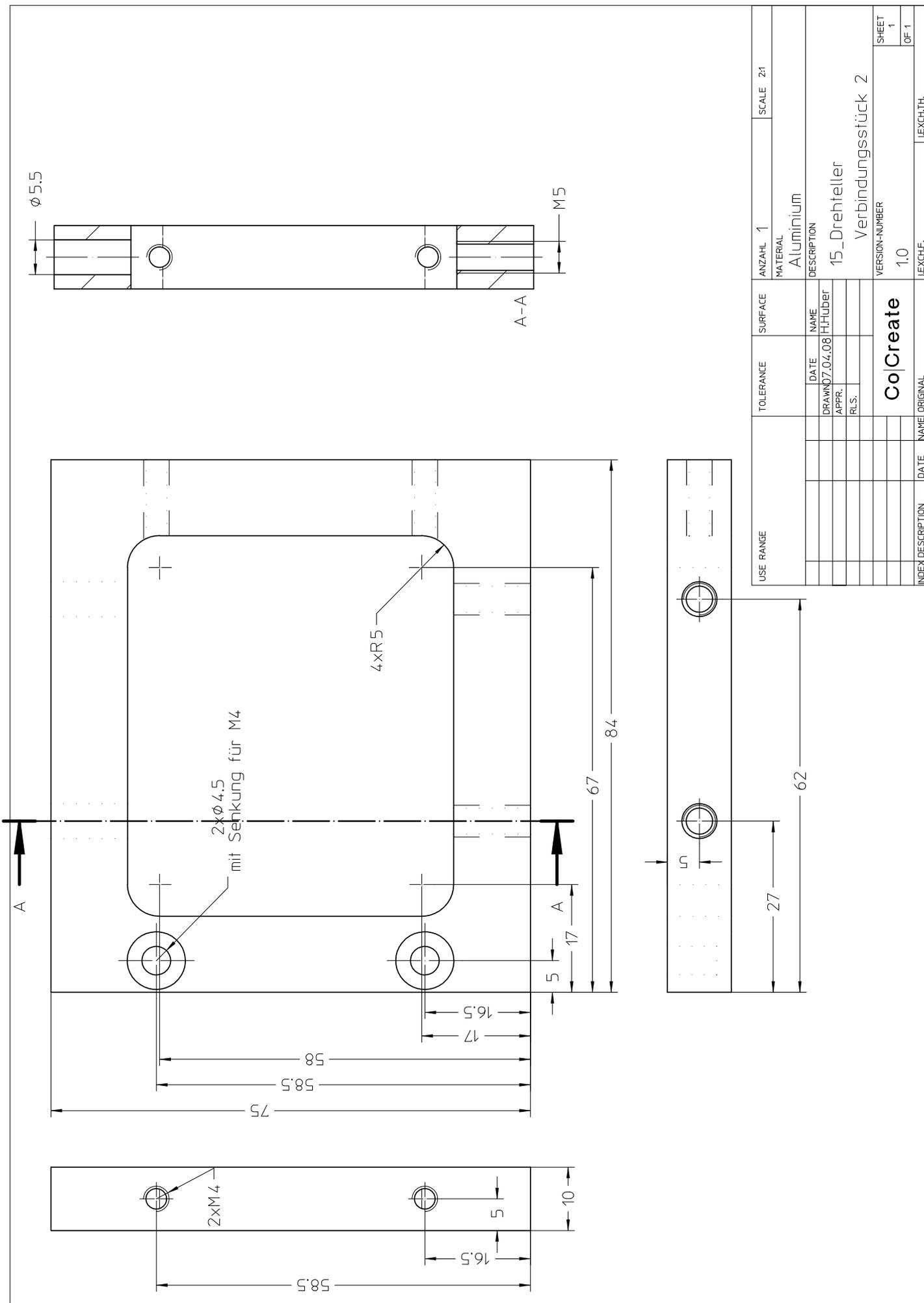
Hersteller	Artikel		Einzelpreis	Lieferzeit	Bemerkungen
Harmonic Drive	AC-Servoantrieb AC-Servoantrieb Kabel rückseitig AC-Servoregler Kabelsatz 10m Externer Reg.-Widerstand Netzfilter Gesamtpreis für zwei Achsen (incl. MWSt)	FHA-11C-30-D200 FHA-11C-30-D200-K SC-610-2-AAAE	1.447,-- 1.504,-- 1.261,-- 430,-- 78,-- 39,-- 7.800,--	6-7 Wochen	schriftliches Angebot zu teuer lange Lieferzeit
A-Drive Technology	Drehtisch mit eisenlosem Direktantrieb passender Regler Gesamtpreis für zwei Achsen (incl. MWSt)	ACD 120-80	ca. 3.300,-- ca. 800,-- ca. 9.800,--		telefonische Auskunft zu teuer
LinMot	Linearmotor + Regler Gesamtpreis für zwei Achsen (incl. MWSt)	P01-23x160/70x210	ca. 1.300,-- ca. 3.100,--	2-3 Tage	Vertreterbesuch ungünstige Einbaugröße erhöhter konstruktiver Aufwand
Maccon	HT Synchron-Servomotor HT Synchron-Servomotor Resolver Regler Xenus Gesamtpreis für zwei Achsen (incl. MWSt)	HT02301 HT02302	ca. 1.200,-- ca. 1.400,-- ca. 200,-- ca. 1.000,-- ca. 6000,--	8 Wochen	telefonische Auskunft Motoren ohne Gehäuse --> erhöhter konstruktiver Aufwand lange Lieferzeit
Maxon	EC flat 90 EC flat 45, Encoder, Stirnradgetriebe low noise Getriebe Regler Gesamtpreis für zwei Achsen (incl. MWSt)		ca. 200,-- ca. 300,-- ca. 1.500,--	10 Wochen	Vertreterbesuch sehr leise lange Lieferzeit
Trinamic	Schrittmotorsteuerung mit RS485/CAN 64fach Schrittmotorsteuerung mit RS485/CAN 256fach Schnittstellen Konverter Netzteil Schrittmotor Microstep 0,49 Nm Schrittmotor Microstep 0,98 Nm Schrittmotor Microstep 1,63 Nm Gesamtpreis für zwei Achsen (incl. MWSt)	TMCM-102-IF MONOPack 2 USB-2-485 QSH4218-51-10-049 QSH5718-55-30-098 QSH5718-79-30-163	310,-- 336,-- 64,-- ca. 120,-- 36,-- 60,-- 91,-- ca. 1200,--	auf Lager auf Lager auf Lager auf Lager wird bestellt auf Lager	zu beziehen über Schuricht angeblich leiser Lauf durch Microstepping trotzdem Schrittmotor Nachfragen wg Geräuscentw.
Portescap	leiser Scheibenläufer Schrittmotor 0,78 - 1,3 Nm Inkrementalencoder (dann evtl. über Trinamic steuerbar)	Turbo Disc P850 E9	ca. 400 \$ ca. 90 \$		zu beziehen über deltaline- europe.com
Servida GmbH	Kompaktantrieb mit BLDC Servomotor Netzteil Gesamtpreis für zwei Achsen (incl. MWSt)	SV2315DT SV2316D SV2316DT	ca. 500,-- ca. 500,-- ca. 600,-- ca. 50,-- ca. 1500,--	ab Lager	www.servida.de schicken Testexemplar
itk Dr. Kassen GmbH	Kompletteinheit Schrittmotor + Regler bis 40 U/s - 0,9 Nm - RS232 Daisychain Netzteil Gesamtpreis für zwei Achsen (incl. MWSt)	Pollux Drive Type-3 HT	804,-- ca. 100,-- ca. 2100,--	auf Lager	zu beziehen über Schuricht Nachfragen wg Geräusch



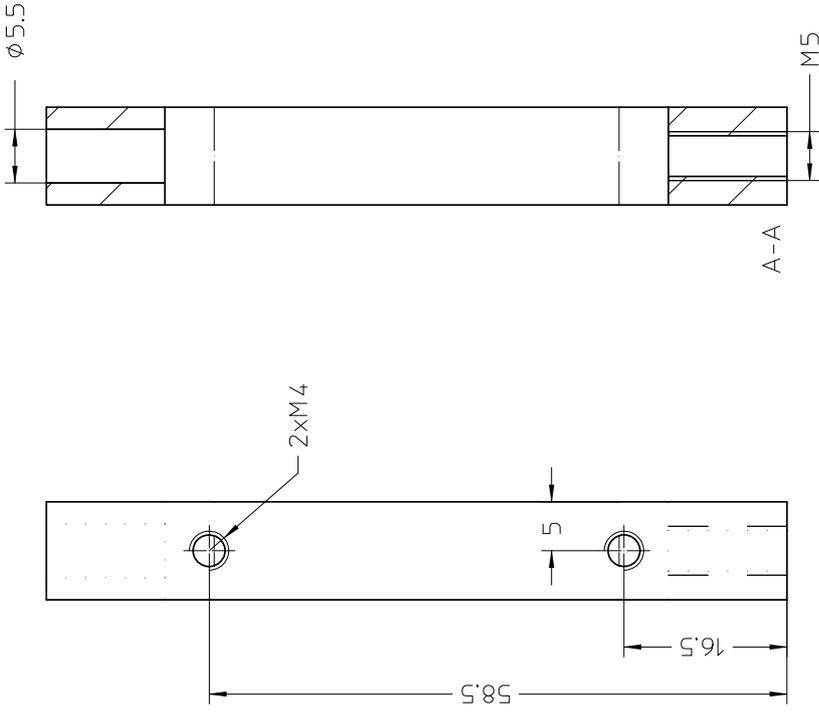
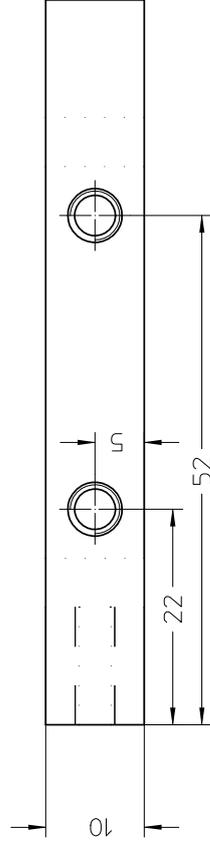
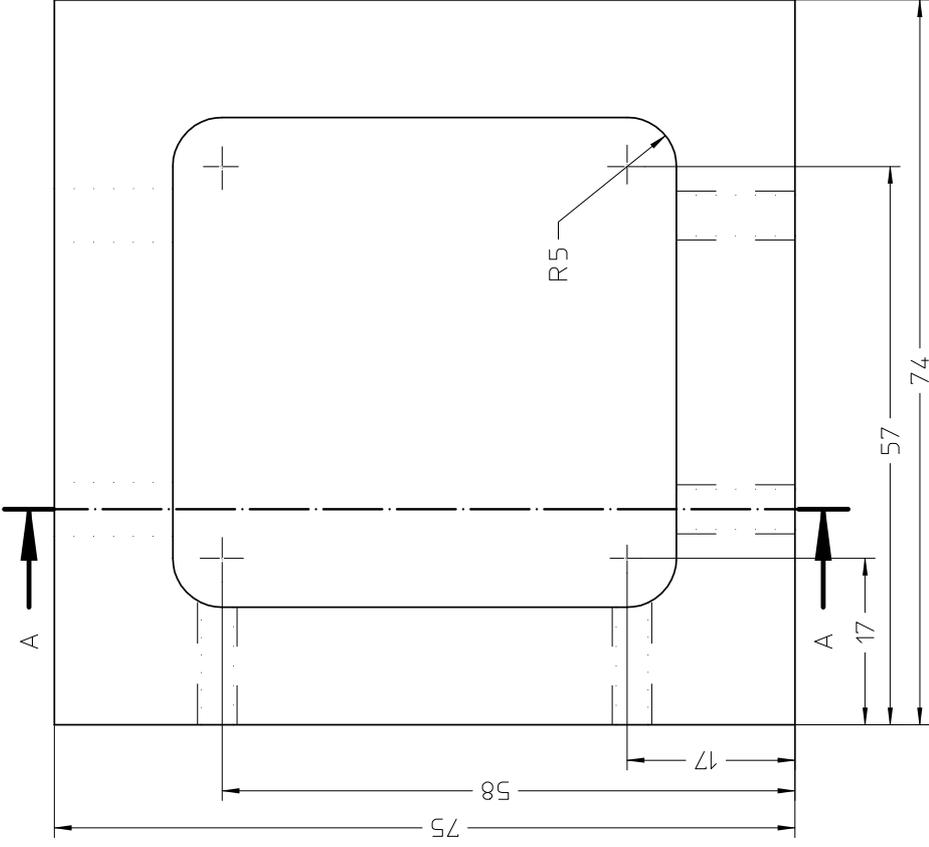
USE RANGE		TOLERANCE	SURFACE	ARCHIVE	SCALE
				MATERIAL	5:1
				Aluminium	
				DESCRIPTION	
		DATE	NAME		
		DRAWN	H.HUBER		
		APP.			
		RLS.			
		4_Lagerplatte Antriebswelle			SHEET
		VERSION-NUMBER			1
		1.0			OF 1
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	EXCHG.
		CoCreate			



USE RANGE	TOLERANCE	SURFACE	ARCHIVE	SCALE
			MATERIAL Aluminium	2:1
			DESCRIPTION Lagerdeckel Hauptwelle unten	
			VERSION-NUMBER 1.0	SHEET 1
			DATE DRAWN: 02.04.08	OF 1
			NAME H. Huber	
			APPR.	
			R.L.S.	
			CoCreate	
INDEX DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	LEXCH.F.



USE RANGE	TOLERANCE	SURFACE	ANZAHL	SCALE
			1	2:1
		MATERIAL	Aluminium	
		DESCRIPTION	15_Drehteller	
		VERSION-NUMBER	Verbindungsstück 2	
		DATE	7.04.08	
		APPR.	H.Huber	
		RLS.		
		CoCreate		
		NAME	ORIGINAL	
		DATE		
		DESCRIPTION		
		INDEX		
		EXCHG.	1.0	
		EXCHG.	1	
		EXCHG.	OF 1	



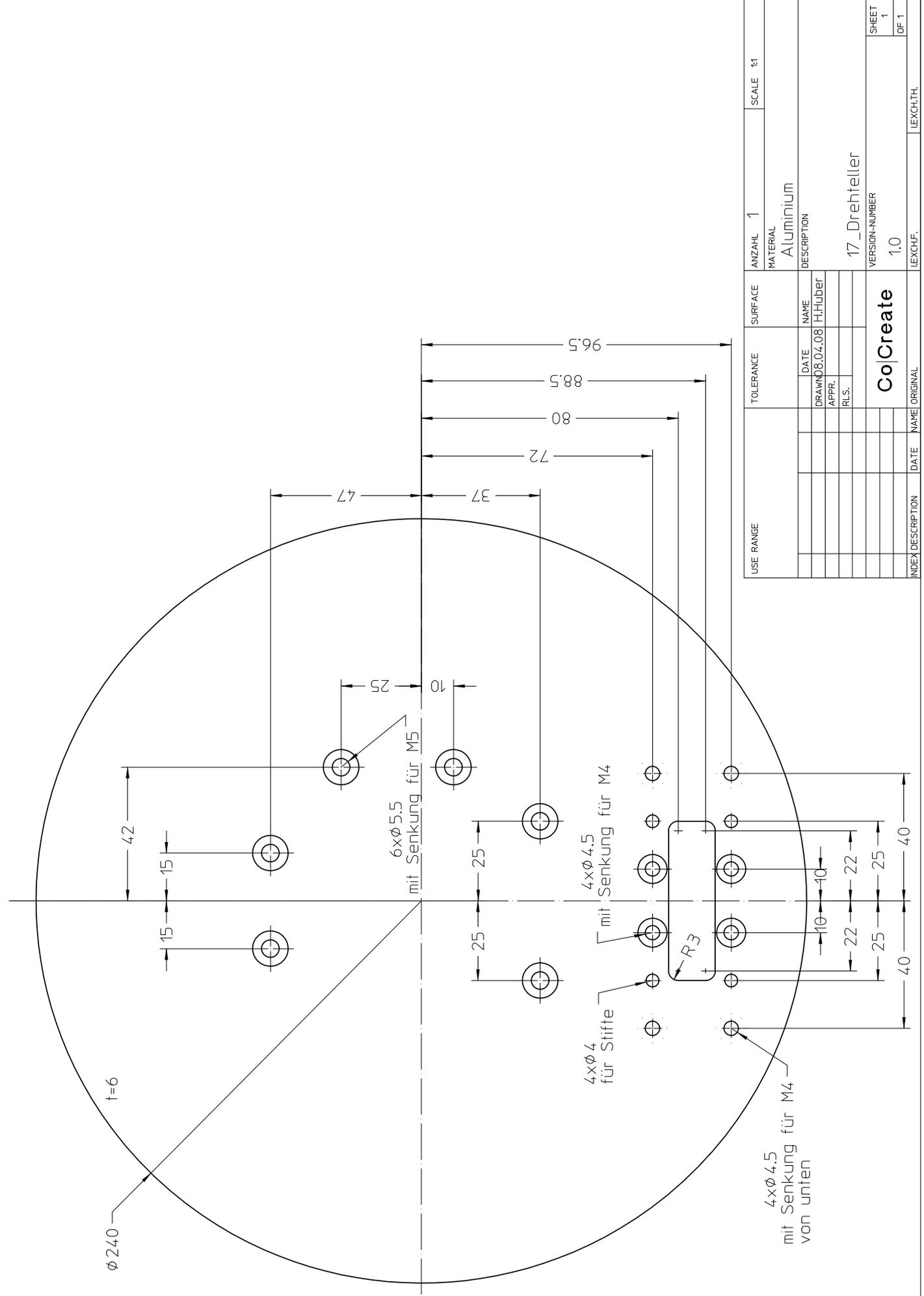
USE RANGE	TOLERANCE	SURFACE	ANZAHL	SCALE
			1	2:1

MATERIAL	DESCRIPTION
Aluminium	16_Drehteller
	Verbindungsstück 3

VERSION-NUMBER	SHEET
1.0	1

INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	LEXCH.F.

CoCreate	VERSION-NUMBER	SHEET
	1.0	1

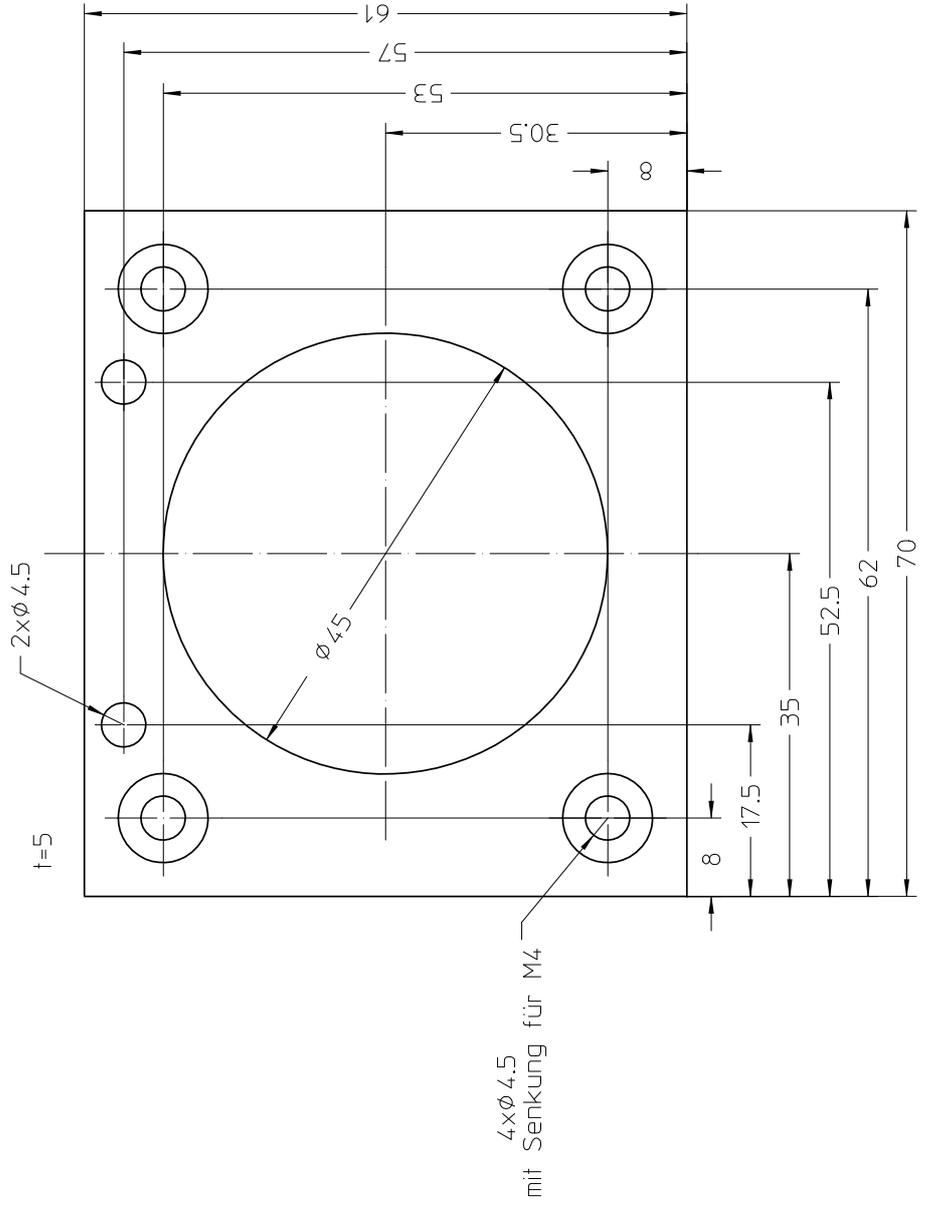


USE RANGE		TOLERANCE	SURFACE	ANZAHL	SCALE
				1	1:1
		MATERIAL		Aluminium	
		DESCRIPTION		17_Drehteller	
		VERSION-NUMBER		1.0	
		LEXCH.F.		1	
		SHEET		1	
		OF		1	

DATE	NAME
DRAWN 08.04.08	H.HUBER
APP.	
RLS.	

INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL

CoCreate	
VERSION-NUMBER	1.0
LEXCH.F.	1



USE RANGE		TOLERANCE	SURFACE	ANZAHL	SCALE
				1	2:1
		MATERIAL Aluminium			
		DESCRIPTION 18_Schwenkmoior Grundplatte			
		VERSION-NUMBER 1.0			
		SHEET 1 OF 1			
		IEXCH.F. IEXCH.TH.			
INDEX	DESCRIPTION	DATE	NAME	ORIGINAL	CoCreate

DATE	NAME
DRAWN 07.04.08	H.Huber
APPR.	
RLS.	

