



Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Bachelor of Engineering (B. Eng.)

im Studiengang
Audiovisuelle Medien

im Unternehmen
Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft

Optimierung mehrkanaliger High-End Soundsysteme hinsichtlich Klangqualität
durch gezielte Auswahl/Parametrisierung der Delay-Strukturen
und Kompressor-/Limiter Funktionen

vorgelegt von:

Ajan-Alexander Hannemann
an der Hochschule der Medien Stuttgart
Fakultät Electronic Media

am:

20.08.2014

Erstprüfer:
Zweitprüfer:

Prof. Oliver Curdt
Dipl. Ing. Stephan Bayer



PORSCHE



Sperrvermerk

Die vorliegende Abschlussarbeit enthält zum Teil Informationen, die nicht für die Öffentlichkeit bestimmt sind. Alle Rechte an der Abschlussarbeit einschließlich der Verbreitung auf elektronischen Medien liegen bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

Abweichend hiervon darf der Inhalt der Abschlussarbeit während einer Sperrzeit von 5 Jahren ab dem Abgabedatum nur mit der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG an Dritte weitergegeben werden. Nach Ablauf der Sperrzeit ist diese Genehmigung nicht mehr erforderlich.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Ajan-Alexander Hannemann, an Eides Statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: "Optimierung mehrkanaliger High-End Soundsysteme hinsichtlich Klangqualität durch gezielte Auswahl/Parametrisierung der Delay-Strukturen und Kompressor/Limiter Funktionen" selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 23 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der HdM) sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. § 156 StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Stuttgart, 20.08.2014

Ajan-Alexander Hannemann

Kurzfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird das High-End-Soundsystem des Porsche Panamera der ersten Generation hinsichtlich Klangverbesserungsmaßnahmen durch gezielte Parameterwahl bei Kompressoren und Limitern, sowie Delaystrukturen, untersucht. Die Bearbeitung der Themen wurde durch das Einbinden externer Audiotechnik in den Audioflow des Fahrzeuges und einer Klangadaption des im Fahrzeug installierten Burmester Systems auf die externen Geräte ermöglicht. Die im Panamera High-End-Soundsystem gesetzten Kompressor und Limiter Parameter werden messtechnisch ermittelt, in ihrer Arbeitsweise analysiert und Optimierungsansätze dargelegt. In der ersten Generation des Porsche Panamera ist keine Delaystruktur im Stereo-Modus implementiert. Die Arbeit führt in die Grundlagen und Auswirkungen von Laufzeitverzögerungen ein und zeigt mögliche Szenarien und Methodiken zur Erstellung einer Delaystruktur auf. Die subjektive Bewertung der Klangeigenschaften von Laufzeitkorrekturen hinsichtlich einer Verbesserung gegenüber der jetzigen Fahrzeuggeneration wurde durch Probanden in Hörversuchen festgestellt. Aufbauend auf in dieser Arbeit ermittelten Delaystrukturen ist in der zukünftigen Panamera Generation der Einsatz einer Delaystruktur im normalen Stereo-Betrieb vorgesehen. Festgestellte Defizite in der Parametrisierung und Arbeitsweise der Kompressoren und Limiter werden ermittelt und vorgeschlagene Optimierungsansätze in künftigen Generationen berücksichtigt.

Abstract

This bachelor thesis examines the high-end sound system of the first generation of Porsche's Panamera. Measures of sound improvement were made through focus on parameter choices of compressors and limiters as well as delay structures. By installing external audio technology into the sound system of the vehicle, it became possible to adapt the sound of the Burmester system to the external equipment and to work on the topics. The compressor and limiter parameters of the high-end sound system of the Panamera are metrologically captured, their functioning is analyzed and optimizations are presented. Porsche's Panamera first generation did not implement a delay structure in its stereo-mode. This bachelor thesis introduces the foundations and effects of delay and demonstrates possible scenarios and methods in establishing a delay structure. The subjective assessments of the sound properties regarding the improvement of time alignment compared to the present vehicle generation were evaluated with interns in audio tests. Based on the examination and findings of this bachelor thesis Porsche plans to put delay structures in future Panamera generations in normal stereo-mode. Deficits in the choice of parameters and functioning of compressors and limiters were examined and the recommended optimizing approaches will be considered in future generations.

Inhaltsverzeichnis

Sperrvermerk	I
Eidesstattliche Erklärung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Architektur eines High-End Soundsystems im Fahrzeug	3
3 Dynamikprozessoren: Kompressor und Begrenzer	7
3.1 Kompressor	7
3.2 Regelzeitenproblematik	9
3.3 Begrenzer (Limiter)	11
4 Prinzipielle Ansätze einer Delay-Architektur	13
4.1 Mehrwegesystem	13
4.1.1 Filter	14
4.1.2 Equalizer	16
4.1.3 Gruppenlaufzeit digitaler Filter	17
4.1.4 Gruppenlaufzeit eines Mehrwegesystems	18
4.2 Mehrkanal-Stereofonie	19
4.3 Räumliche Darstellung	21
5 Parameter für die Bewertung und Interpretation klanglicher Eigenschaften	23
5.1 Messparameter	23
5.2 Subjektive akustische Qualitätsparameter	25
6 Versuchsaufbau	27
6.1 Fahrzeug	27
6.1.1 DSP Verstärker	27
6.1.2 Lautsprechersystem	29
6.2 Pro Audio Equipment	30
6.2.1 Hardware	30

6.2.2	Endstufen.....	32
6.2.3	Software	33
7	Adaptieren der Klangabstimmung des G1-Soundsystems.....	34
7.1	Erstellung des Automotive Signalfusses auf Audio Architect.....	34
7.2	Korrekturen der Übertragungsfunktion	36
7.3	Ermittlung der statischen und dynamischen Kompressor-Parameter	37
7.3.1	Messaufbau.....	38
7.3.2	Messdurchführung und Ergebnisse.....	39
7.4	Ermittlung der statischen und dynamischen Limiter-Parameter	42
7.4.1	Messaufbau.....	42
7.4.2	Messdurchführung und Ergebnisse.....	43
7.4.3	Mechanische und thermische Schutzlimiter	46
8	Auswertung und Optimierungsansatz der bestehenden Kompressor-/ und Limiter-Parameter	48
8.1	Limiter-Parameter – Auswertung und Optimierungsansätze.....	48
8.1.1	Verzerrungen der Tieftonkanäle.....	48
8.1.2	Ermittlung und Optimierung der Limiter-Parameter im Systemzusammenhang	53
8.2	Kompressor-Parameter – Auswertung und Optimierungsansätze.....	57
9	Untersuchungen zu Delaystrukturen	59
9.1	Anordnung der Lautsprecher und daraus resultierende Auswirkungen	59
9.2	Gruppenlaufzeitentzerrung der jeweiligen Mehrwegesysteme.....	59
9.2.1	Messaufbau und Methodik	60
9.2.2	Bestimmung der Delayzeiten	61
9.2.3	Gesamthöreindruck und Ergebnisse	64
9.3	Laufzeitentzerrung innerhalb des Gesamtsystems	65
9.3.1	Optimierung vorne/hinten spezifisch.....	65
9.3.2	Optimierung links/rechts spezifisch.....	70
9.3.3	Hörversuche	71
10	Fazit und Ausblick	75
	Literaturverzeichnis	77
	Anhang.....	80

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: High-End-Soundsystem in einem Fahrzeug am Beispiel des Porsche Panamera G1.....	4
Abb. 3-1: Dynamikprozessoren: Kompressor und Begrenzer.....	7
Abb. 3-2: Attack- und Releasephase eines Dynamikprozessors.....	9
Abb. 3-3: Auswirkungen durch zu lange oder kurze Regelzeiten auf hohe oder tiefe Frequenzen	11
Abb. 3-4: Wirkungsweise der verschiedenen Limitertypen auf den Amplitudenverlauf.....	12
Abb. 4-1: Vergleich von Betragsfrequenzgang Butterworth und Linkwitz-Riley	15
Abb. 4-2: Bell-Filter (Glockenfilter).....	16
Abb. 4-3: Wirkung der Laufzeitdifferenz	21
Abb. 6-1: Übersicht der Verkabelung der externen Geräte.....	31
Abb. 7-1: Audioflow G1-Burmester-System.....	34
Abb. 7-2: Audioflow Audio Architect / BSS-BLU-100	35
Abb. 7-3: Frequenzgang Mittelton vorne rechts	36
Abb. 7-4: Messsignal und dynamisches Verhalten Kompressor/Limiter	38
Abb. 7-5: Dynamisches Verhalten des Kompressors im Mittelton – Attackphase	39
Abb. 7-6: Dynamisches Verhalten des Kompressors im Mittelton – Release.....	40
Abb. 7-7: Vergleich der Abbildung der Dynamikprozessoren im BSS Automotive Singalflow	42
Abb. 7-8: Nachbildung der Limiter-Senke (Release) am BSS-Controller	43
Abb. 8-1: Elektrische Messung Tiefton vorne, 20 bis 29 Clicks bei 0dB Eingang.....	48
Abb. 8-2: Elektrische Messung des Ausgang des Tieftonkanals-VR.....	49
Abb. 8-3: Frequenzgang TT vorne rechts, 100Hz, 30 Clicks, Tür offen Rechts	49
Abb. 8-4: Frequenzgang TT 30L geschlossenes Gehäuse, 100Hz	49
Abb. 8-5: Verzerrerschaltung Symmetrisch XLR	51
Abb. 8-6: Einsetzen der Limiter im G1 v23 (Threshold dBFS).....	54
Abb. 8-7: Limitierung der Ausgangsspannung im Vergleich	55
Abb. 8-8: Headroom in dB zwischen dem Einsetzen des BSS-Peak-Limiters gegenüber dem G1-Peak-Limiter.....	56
Abb. 9-1: Anordnung der Lautsprecher im Panamera (G1).....	59
Abb. 9-2: Einbauorte des Tiefton-, Mittelton-, Hochton- und Center-Lautsprecher im Panamera G1.....	60
Abb. 9-3: Symmetrische Verzögerung der Lautsprecher innerhalb ihrer Gruppe auf ihre zugehörigen Hörplätze.....	60
Abb. 9-4: Vergleich Übergangsbereich TT MT nur vorne links + Sub	63
Abb. 9-5: Einzelne Sprungantworten von TT, MT und HT, auf Amplitudenanstieg	63
Abb. 9-6: Einzelne Sprungantworten von TT, MT und HT, auf Amplitudenspitze	64
Abb. 9-7: Frequenzgang TT MT vorne: Verzögerung auf Amplitudenanstieg, auf maximale Amplitude und ohne Delay...64	
Abb. 9-8: Sprungantworten der einzelnen Lautsprecher. Verzögert auf die max. Amplitude des TT vl, TT hl, MT vl, MT, CT. HT der Übersicht halber nicht abgebildet.....	66
Abb. 9-10: Visualisierung der Wahrnehmung unterschiedlicher Delayzeiten des CT und der Fondlautsprecher.....	68
Abb. 9-11: Vergleich des Amplitudenverlaufs der TT vl und hl zu unterschiedlichen Delayzeiten	68
Abb. 9-12: Ohne Verzögerung auf den Subwoofer: Sprungantworten des Soundsystems ohne Subwoofer und des Subwoofers.....	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Subjektive akustische Qualitätsparameter nach EBU Tech3286	26
Tabelle 6-1: Übersicht der eingebauten Lautsprecher im Porsche Panamera G1	29
Tabelle 6-2: Ein- und Ausgangsspannung abhängig vom Voltage Gain	32
Tabelle 7-1: Frequenzweichen-Design Burmester-Verstärker	37
Tabelle 7-2: Kompressor-Parameter Panamera G1	37
Tabelle 7-3: Kompressor Threshold – absolut Werte.....	41
Tabelle 7-4: Einsetzen von Verzerrung im Burmester-Verstärker mit 0220 Datensatz	44
Tabelle 7-5: Limiter Threshold und Einsetzen von Verzerrungen.....	45
Tabelle 7-6: Berechnungsbeispiel des RMS-Limiters für den Center-LS	46
Tabelle 9-1 Direkte Abstandsmessungen der Einzellautsprecher der Lautsprechergruppe vorne links.....	61
Tabelle 9-2: Direkte und indirekte Abstandsmessungen Lautsprechergruppe vorne links	61
Tabelle 9-3: Häufigkeiten der Favorisierten Presets	72

Abkürzungsverzeichnis

9x1	Porsche Sportwagenplattform
AMT	Air Motion Transformer
AUX	von engl. Auxiliary, analoger Eingang für stereophone Audiosignale
BMW	Bayrische Motoren Werke
BSS	BSS Networked Audio Systems, Hersteller von Pro Audio Hardware
BW	Butterworth
BTL	Bridged Transless
CAN	Controller Area Network
CD	Compact Disc
CT	Center (Lautsprecher)
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAW	Digital Audio Workstation
dB	Dezibel
dB SPL	Dezibel Sound Pressure Level
DSP	Digital Signal Processor
DTS	Digital Theatre Systems
EBU	European Broadcast Union
EIZ	Elektronik Integrationszentrum
EQ	Equalizer
FIR	Finite Impulse Response
FOT	Front Optical Transmitter
G1	Entwicklungskürzel für den Porsche Panamera der ersten Generation
G2	Entwicklungskürzel für den Porsche Panamera der zweiten Generation
GLZ	Gruppenlaufzeit
GR	Gain Reduction
HD	High Definition
HiFi	High Fidelity
HMI	Human Machine Interface
HT	Hochton (Lautsprecher)
HU	Head Unit
Hz	Hertz
IIR	Infinite Impulse Response
INIC	Integrated Network Interface Controller
LFE	Low Frequency Effect
LIN	Local Interconnect Network

LZI	Linear zeitinvariantes System
LR	Linkwitz-Riley
LS	Lautsprecher
MIB	Modularer Infotainment Baukasten (des VW-Konzerns)
MOST	Media-Oriented System Transport
MT	Mittelton (Lautsprecher)
NTM	Neville Thiele Method
PA	Public Address
PCM	Porsche Communication Management
PerC	Peripheral Controller
RCA	ungenormte 2-Pol Steckverbinder, umgangssprachlich „Chinch“
ROM	Read Only Memory
RTA	Real Time Analyzer
SD	Secure Digital Memory Card, „sichere digitale Speicherkarte“
SEO	Schallentstehungsort
SPL	Sound Pressure Level
SR	Surround (Lautsprecher)
SUB	Subwoofer
TSP	Thiele – Small Parameter
TT	Tiefton (Lautsprecher)
USB	Universal Serial Bus
VCA	Voltage Controlled Amplifier
VNC	Vehicle Noise Compensation
W-LAN	Wireless local area network
XLR	Industriestandard für elektrische Steckverbindungen, 3-Pol

1 Einleitung

Einen genussvollen Klang der Lieblingsmusik im eigenen Fahrzeug, der dem der HiFi-Anlage zuhause entspricht, ist ein Wunsch, ist ein zunehmend von Kunden der Automobilbranche geäußert wird. Zunächst waren es die Premium-Fahrzeughersteller, die das Potential der High-End-Soundsysteme für ihre Marke erkannten und im letzten Jahrzehnt begannen, das Hörerlebnis „Home-HiFi“ in ihre Fahrzeuge zu übertragen. Mittlerweile finden sich allerdings nicht nur in der Oberklasse, sondern auch in Mittelklassefahrzeugen hochwertige Soundsysteme, denn die Qualität des Soundsystems spielt eine hervorzuhebende Rolle in der Wahrnehmung der Qualität der Fahrzeuge.¹ Mit dem ständigen Anspruch der Hersteller, mit jeder Fahrzeuggeneration die Wiedergabequalität der Systeme weiter zu verbessern, wachsen die Anforderungen an die Audiotechnik und das Wissen der Experten. Die multimediale Infrastruktur in den Fahrzeugen wird zunehmend komplexer und bietet audiotekhnisch immer mehr Gestaltungsmöglichkeiten. Gleichzeitig wird man mit den erschwerten Bedingungen, welche in Fahrzeugen hinsichtlich Raumbeschaffenheit, Störgeräuschen und Stromversorgung vorliegen, konfrontiert. Durch eine hohe Anzahl an Lautsprechern und einer immer weiter entwickelten Endstufen- und Soundprocessing-Technik arbeitet man gegen diese an. Eine hohe Anzahl von Lautsprechern, angesteuert von den der Fahrzeugumgebung angepassten spezifischen Automotive-Endstufen, sollte entsprechend kontrolliert werden. Im Audioflow implementierte Kompressoren und Limiter lassen eine erhöhte Signalkontrolle im Grenzbereich des Systems zu. Um hörbare Regelvorgänge und Artefakte der Dynamikprozessoren sowie Verzerrungen bei hohen Lautstärken möglichst gering zu halten und gleichzeitig eine maximale Leistungsausbeute des Systems zu erreichen, sind die Parameter mit Sorgfalt zu wählen. Die im Porsche Panamera gegebenen Parameter werden ermittelt und hinsichtlich Optimierungspotentialen untersucht. Für die Untersuchung und Findung klang-optimierender Parameter war es notwendig, externe professionelle Audiotechnik in das Fahrzeug einzubinden. Diese gewährleistet ein flexibles Arbeiten mit hohem Bedienkomfort, sowie ausreichend Leistungsreserven, wodurch eine detaillierte Betrachtung der gestellten Themen realisierbar ist. Die Möglichkeit, durch den externen Controller einzelne Audiokanäle zu verzögern und dadurch das Eintreffen der Schallwellen zeitlich zu kontrollieren, bietet mannigfaltige Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich des Klangeindrucks am Hörplatz. Im Porsche Panamera der ersten Generation finden im einfachen Stereo-Betrieb des High-End-Soundsystems Laufzeitkorrekturen keine Anwendung. Die vorliegende Arbeit erörtert anhand verschiedener vorgestellter Methodiken das klangliche Optimierungspotential, welches Delaystrukturen im Porsche Panamera bieten. Die subjektive Bewertung der verschiedenen Delaystrukturen erfolgt durch Hörversuche mit mehreren Probanden. In den Kapiteln 6 und 7 wird die Integration dieser externen Technik, sowie die Klangadaption der Wiedergabeeigenschaften des Panamera (G1) auf die Komponenten beschrieben. Zunächst wird jedoch im Grundlagenteil in Kapitel 2 auf die Definition und

¹ Vgl. CRAWFORD (2007), Seite 43

prinzipielle Architektur eines High-End Soundsystems im Fahrzeug eingegangen und anschließend die Arbeitsweise von Dynamikprozessoren und die Auswirkungen von Laufzeitunterschieden in den Kapiteln 3 und 4 erläutert. In Kapitel 5 werden grundlegende Parameter, die der Definition und Bewertung von Klangeigenschaften dienen, aufgezeigt. Durch die Darlegung der Grundlagen lassen sich die in den Kapiteln 8 und 9 ergründeten klangverbessernden Maßnahmen hinsichtlich der Parameterauslegung der Kompressoren und Limiter, sowie verschiedener Delaystrukturen, besser nachvollziehen. Abschließend klärt ein Resümee in Kapitel 10 zusammenfassend über die Ergebnisse und den möglichen Nutzen dieser Arbeit für zukünftige Porsche Fahrzeuggenerationen auf.

2 Architektur eines High-End Soundsystems im Fahrzeug

Im Oberklasse-Segment versuchen Automobilhersteller, durch die Zusammenarbeit mit den aus dem Home-HiFi Bereich bekannten Herstellern, Alleinstellungsmerkmale im Gebiet der High-End Soundsysteme zu setzen. Dabei arbeiten deutsche Automobilhersteller mit renommierten HiFi-Herstellern wie Dynaudio, Bang & Olufsen, Bose oder, wie im Fall der Porsche AG, mit Burmester zusammen. Daneben werden in den Entwicklungsprozess externe Experten, wie HiFi-Studios² oder das Fraunhofer IIS in Erlangen, zusätzlich zu den Komponenten-Lieferanten, integriert. Der zusätzliche Entwicklungsaufwand der komplexen Audiosysteme und die dadurch zusätzlich entstehenden Kosten geben Aufschluss über den Stellenwert, welchen High-End Soundsysteme in der Automobilwelt mittlerweile einnehmen. War es zu Beginn ein einzelner Lautsprecher, der die Ohren und Gemüter der damaligen Zeit zu befriedigen vermochte, so sind es heute 10- bis 24-Kanal-Systeme, einzeln durch Digitale Sound Prozessoren (DSP) in bis zu 40bit Auflösung angesteuert, welche dem anspruchsvollen Kunden heutzutage gerecht werden. Derzeit investieren die Premiumfahrzeughersteller vor allem in die Implementierung der dritten Hördimension im Fahrzeug, dem sogenannten 3D-Sound in Form von zusätzlichen Höhenlautsprechern. „[...] [Früher hinkte das Auto der Hifi-Entwicklung immer hinterher“ so Fraunhofer IIS Experte Oliver Hellmuth, durch die finanzkräftige Automobilbranche wendet sich inzwischen das Blatt.³ Grundsätzlich unterscheidet sich die Architektur der High-End Soundsysteme in den Fahrzeugen der verschiedenen Hersteller nur geringfügig. Der offensichtlichste Unterschied liegt in der Wahl der unterschiedlichen Einbauorte der Chassis. Besonders im Tieftonbereich verfolgen Automobilhersteller unterschiedliche Ansätze. BMW installiert ihre Tieftöner unter den Sitzen, Audi und Porsche in den Türen, Mercedes jüngst in der Stirnwand des Fußraumes. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Einbauorte sollen in dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Außer dem Tieftöner sind in der Regel separate Chassis für Mittel- und Hochtonwiedergabe im vorderen Bereich sowie im Fond untergebracht. Zusätzlich im Fond installierte Surroundlautsprecher sorgen für räumliches Hören und dienen der Wiedergabe von Quellmaterial im 5.1 Format. Ein zentrales Chassis in der Mitte des Armaturenbrettes hilft bei der Stabilisierung der Stereoabbildung. Bei der Wahl der Chassis reicht es nicht aus, auf konventionelle HiFi-Chassis der Premiumhersteller zurückzugreifen, vielmehr sind angepasste Neuentwicklungen notwendig. Beispielsweise ist der Raum hinter der Verkleidung eines in die Tür eingebauten Tieftonchassis mit seiner herkömmlichen, konkaven Bauweise und seinem vergleichsweise hohen Hub nicht ausreichend, er muss in seiner Architektur auf die vorliegenden Gegebenheiten abgestimmt werden.

² Vgl. SCHICKEDANZ (2007)

³ HELLMUTH (2013)



Abb. 2-1: High-End-Soundsystem in einem Fahrzeug am Beispiel des Porsche Panamera G1. Quelle: Porsche

Gegenüber dem Aufbau konventioneller Wohnzimmer HiFi-Anlagen gestaltet sich die Installation eines High-End Soundsystems in einem Fahrzeug als komplexer und problematischer. In Zeiten von Emissionsverminderungsvorschriften und Effizienzsteigerungen von Fahrzeugen gilt für High-End Soundsysteme die gegensätzliche Anforderung, unter immer weniger Gewicht immer mehr Leistung zu bringen. Gleichzeitig steht mit der regulären Bordnetzspannung von maximal 14,4V nur ein Bruchteil der Spannung bereit, die eine Haushalts-Steckdose zur Verfügung stellt. Durch das Generieren von Alleinstellungsmerkmalen, wie neuen Wiedergabeverfahren und zunehmender Kanalanzahl, versuchen sich die Fahrzeughersteller einen Wettbewerbsvorteil zu schaffen. Die Platzierung der zahlreichen Chassis ist oft mit Kompromissen verbunden, die nicht immer zu einem optimalen Ergebnis führen. Lautsprecher werden in der Verkleidung installiert, worin der Platz beschränkt ist. Vibrationen anderer Bauteile müssen vermieden werden und das Ohr des Zuhörers befindet sich zumeist nicht auf der Achse zum Lautsprecher. An den Kanten des Interieurs entstehen frequenzabhängige, diffuse Reflexionen. Durch schallharte Flächen, wie etwa den Fensterscheiben, kommt es zu Reflexionen, welche als Spiegelschallquellen wahrgenommen werden. Diese negativen Einflüsse des Fahrzeuginnenraums und seine geringe Größe führen je nach Hörposition zu Interferenzen und Auslöschungen im Frequenzspektrum. Die geringen Raummaße bewirken eine Überlagerung einfallender und reflektierter Wellen, was zur Bildung stehender Wellen führt. Diese Raummoden sorgen unterhalb der Schröderfrequenz⁴ für einen unausgewogenen Klang.⁵ Resonanzdämpfungen und Erhöhungen lassen keinen linearen Frequenzgang zu, weshalb sie durch aktive Entzerrung kompensiert werden sollten. Die kurze Nachhallzeit, bedingt durch den hohen Absorptionsgrad des Innenraums, führt zu einem geringeren Schalldruckpegel, als er unter identischer Wiedergabetechnik im heimischen Wohnzimmer entstehen würde. Es wird aber auch ein positiver Nutzen aus der Architektur der Fahrzeuge gezogen. So profitiert der Bassbereich durch den Druckkammereffekt unmittelbar von dem geringen Raumvolumen des Fahrzeuginnenraumes. Ist der Raum, in dem der Schall erzeugt wird, erheblich kleiner als die

⁴ Berechnet sich aus Nachhallzeit und Raumvolumen

⁵ Vgl. GÖRNE (2011), Seite 79

Wellenlänge der wiedergegebenen Frequenz⁶, erzeugt der Lautsprecher anstatt einer Welle im gesamten geschlossenen Raum eine periodische Luftdruckänderung. Der entstehende Wechseldruck wird vom menschlichen Ohr als Schall wahrgenommen.⁷ Folglich sind die auf Reflexionen basierenden Raummoden im Wirkungsbereich des Druckkammerprinzips nicht mehr existent. Außerhalb des Druckkammerbereichs steigt der notwendige Membranhub im Quadrat reziprok zur Frequenz. Ab dem Einsetzen des Effekts ist jedoch ein konstanter Membranhub ausreichend, um den Schalldruck zu halten. Das heißt, dass man durch den Druckkammereffekt mit weniger Leistung einen gleichbleibenden Tiefgang und Schalldruck erreicht.

Akustische Störwirkungen, verursacht durch Geräusche des Powertrain⁸, Wind- und Abrollgeräusche, welche je nach Fahrzeugtyp, z.B. „Limousine“ oder „Sportwagen“, den Dynamikumfang der Wiedergabe im Fahrzeug beschränken und Signalanteile maskieren, gilt es zu berücksichtigen. Langsamfahrten ausgenommen, dominieren in Limousinen besonders Wind- und Abrollgeräusche gegenüber dem Antriebsgeräusch.⁹ Potential für die akustische Markenführung (auch: acoustic Branding) bietet die Soundgestaltung des Antriebsgeräusches und inwieweit sich dieses vom Wind-Abrollgeräusch abhebt.¹⁰ In einem Porsche 911 etwa muss bei der Gestaltung des Audiosystems das höhere Antriebsgeräusch, sowie die Maskierung gewisser Frequenzbereiche berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, dass dieses einen entsprechend höheren maximalen Schalldruck liefern können muss, als beispielsweise jenes in einer Limousine.

In heutigen Fahrzeugen sind gleich mehrere Netzwerke verschiedener Bussysteme implementiert. Die meisten dienen der Regel- und Steuerfunktionen und bilden die Schnittstelle für Diagnose und Service Systeme. Sie kommunizieren über das sogenannte Controller Area Network (CAN) oder Local Interconnect Network (LIN) Bussystem. Dabei hat jedes System seine Stärken und Schwächen und wird dementsprechend spezifisch eingesetzt.¹¹ In beinahe allen aktuellen Fahrzeugen läuft die Multimediakommunikation über den Media Oriented Systems Transport Bus (MOST-Bus).¹² Über dieses ringtopologische Netzwerk, in dem ein Taktgeber die Systemfrequenz für alle anderen MOST-Geräte vorgibt, werden Audio-, Video-, Sprach- und Datensignale übertragen und im Fahrzeug verteilt. Die drei im Automobilbereich eingesetzten Standards MOST25/50/150 unterscheiden sich dabei u.a. in Flexibilität und Bandbreite. Derzeitig wird in erste Fahrzeuge MOST150, mit dediziertem Ethernet Kanal und der Möglichkeit der synchronen Datenübertragung, integriert.¹³ Am weitesten verbreitet ist derzeit, wie auch im Porsche Communication Management (PCM) System bei Porsche, MOST25 mit

⁶ Der Innenraum eines Fahrzeuges bildet einen $\lambda/2$ -Resonator, unterhalb seiner Resonanzfrequenz gilt das Druckkammerprinzip, beim Panamera TT vorn ab ca. 90Hz

⁷ Vgl. GÖRNE (2011), Seite 81

⁸ Motor-Getriebe-Verband inklusive aller Nebenaggregate, Antriebsstrang bis zum angetriebenen Rad, Ansaug und Abgasanlage

⁹ Vgl. ZELLER (2009), Seite 164

¹⁰ Vgl. SEIFFERT (2011), Seite 63

¹¹ Vgl. GRZEMBA (2007), Seite 35

¹² Vgl. ECKARDT (2013)

¹³ Vgl. MOST COOPERATION (2014), Seite 1

Unterstützung der verlustfreien Übertragung von bis zu 15 unkomprimierten Stereokanälen bei 44,1kHz über Lichtwellenleiter. Neben Steuerdaten werden Audiodaten an die Mehrkanalendstufen übertragen, denen ein oder mehrere DSP zwecks Signalbearbeitung und Verteilung vorgeschaltet sind. Diese arbeiten in der Regel mit 32bit („Blackfin“ und „SHARC“ von Analog Devices) und seit 2009 auch mit 40bit-Floating-Point (SHARC2146xW), übernehmen optional im On-Chip-ROM das Audio-Decoding (wie z.B. Dolby-Digital-Plus und DTS-HD-Master-Audio) und verfügen, um den Core zu entlasten, über extra Hardware-Beschleuniger für Signalverarbeitungsaufgaben wie beispielsweise digitale Filter.¹⁴ Über eine digitale Matrix werden die Signale an Class AB oder D Endstufen weitergereicht, verstärkt und letztendlich über die Lautsprecher wiedergegeben.

Die Hersteller von High-End-Soundsystemen verfügen über unterschiedliche Vorgehensweisen, die Audiosignale der akustischen Umgebung anzupassen. Dies geschieht durch die überlegte Auswahl und Platzierung der Chassis, die klangliche Bearbeitung der einzelnen Kanäle und Algorithmen, welche die Klangbalance und die Lautstärkeverhältnisse in Abhängigkeit mehrerer Parameter wie Motor-, Wind- und Abrollgeräusche regeln. Ein ausgereiftes System stellt dabei die Vehicle Noise Compensation (VNC) dar. Hier misst ein integriertes Mikrofon kontinuierlich die Hintergrundgeräusche im Fahrzeug und gibt diese an den DSP weiter. Die festgestellte Geräuschkulisse fließt unmittelbar in die Bearbeitung des Audiosignals ein. Auch findet jeder Hersteller seinen eigenen Weg, ein zweikanaliges Stereosignal auf 10 oder mehr als 20 Kanäle aufzuteilen. Durch Verzögerungen, Filterdesign und künstliche Halleffekte einzelner Kanäle werden Klang-Presets geschaffen, um im Fahrzeug aus einem einfachen Stereo-Signal ein räumlich einhüllendes Klangerlebnis zu schaffen.

¹⁴ Vgl. CHARY, Seite 7

3 Dynamikprozessoren: Kompressor und Begrenzer

Mittels Dynamikprozessoren wird die Dynamik eines Signals bearbeitet. Dabei gibt es verschiedene Geräte, der grundlegende Aufbau ist allerdings bei allen der gleiche. Ein spannungsgesteuerter Verstärker (Voltage Controlled Amplifier, VCA) wird durch die Hüllkurve des anliegenden Signals oder eines zugeführten externen Signals über einen Steuerzweig (Sidechain) gesteuert. Bei digitalen Dynamikprozessoren wird der Regelverstärker per Software simuliert. Dabei lässt sich das Verhalten über unterschiedliche Parameter beeinflussen.

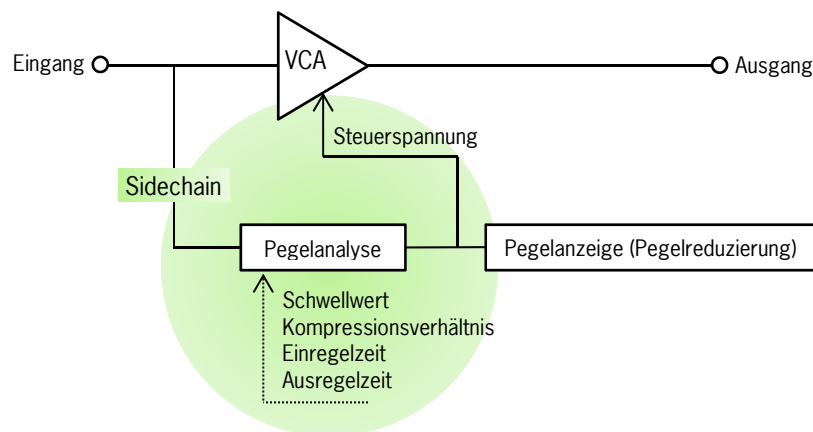


Abb. 3-1: Dynamikprozessoren: Kompressor und Begrenzer. Quelle: Angelehnt an Görne (2011), Seite 356

Im Folgenden werden nur die für diese Arbeit relevanten Arten von Dynamikprozessoren betrachtet. Im DSP Controller des Panamera G1 finden sich digitale Kompressoren sowie Begrenzer (von nun an als Limiter bezeichnet). Ein Kompressor komprimiert die Dynamik des Nutzsignalpegels, ein Limiter begrenzt ihn in seinem Höchstpegel.

3.1 Kompressor

Hört man z.B. einen Popsong im Autoradio, wurde dieser sehr wahrscheinlich bereits mehrere Male an unterschiedlichen Stationen der Übertragungskette komprimiert. Eingriffe durch Kompressoren sind für den Laien schwerer wahrzunehmen als andere klanggestaltende Bearbeitungen, wie solche durch Equalizer oder Hallgeräte. Kompressoren bearbeiten das Signal deutlich subtiler und ein Wirken ist oft nur mittels direktem Vergleich mit dem unbearbeiteten Signal erkennbar. Betrachtet man einen typischen Popsong, so werden Elemente dessen in der Post-Produktion im Tonstudio komprimiert. Anschließend wird im Mastering typischerweise eine Summenkompression angewandt, um nachfolgend, mit dem Ziel dem Radiosender einen eigenen Klangcharakter zu verleihen, vor der Ausstrahlung ein weiteres Mal komprimiert zu werden. In einem Autoradio greift nun gegebenenfalls ein weiterer Kompressor in die Dynamik des Musikstückes ein. Dies verdeutlicht die hohe Relevanz von Kompressoren in der Audioindustrie. In ihrer Arbeitsweise gleichen Kompressoren der manuellen Pegelreduzierung eines

Signals durch einen Toningenieur. Angenommen, ein Tontechniker an einem Mischpult betrachtet auf einer LED Kette den Pegel eines Eingangssignals: Mit einem Finger am Fader des Kanals soll er dafür sorgen, dass dieses Signal, sobald es eine gewisse Schwelle übertritt, in seinem Pegel reduziert wird. Übertritt das Signal diese Schwelle, reduziert er den Pegel um ein festgelegtes Verhältnis; fällt das Signal wieder darunter, erhöht er ihn. Dieser Schwellwert wird als Threshold bezeichnet. Die Zeit, die der Tontechniker braucht, um auf die Signaländerung zu reagieren, nennt man Attack während der Einregelzeit und Release während der Ausregelzeit. Der Tontechniker begrenzt somit die Dynamik eines Signals. Mit der zweiten Hand kann er nun noch den Laustärkeverlust, welche die Reduzierung mit sich bringt, am Ausgang ausgleichen. Dies entspricht dem Auto-Makeup-Gain, wodurch das Signal lauter wirkt als zuvor. Der Kompressor übernimmt die dargelegte Tätigkeit des Tontechnikers vollautomatisch, hochpräzise und mit extremen Geschwindigkeiten. Dabei sind Regelzeiten von $0,2\mu\text{s}$ und weniger möglich. Je nach Anwendung gilt es die Parameter, welche im Anschluss der Erläuterungen zu „Sidechain“ genauer ausgeführt werden, mit Bedacht zu wählen.

Sidechain

Der Steuerzweig (engl. Sidechain) eines Kompressors oder Limiters regelt den VCA, welcher den Ausgangspegel eines Kompressors bestimmt. Der einzigartige Klang eines Kompressors wird hauptsächlich über die Sidechain definiert. Dabei stellt die Pegelanalyse das Kernelement der Sidechain dar. Es gibt unterschiedliche Methoden, mit denen Kompressoren das Audiosignal untersuchen und die gewählten Parameter Anwendung finden, was dementsprechend in unterschiedlichen Klangeigenschaften resultiert. Eine einfache, schnell reagierende Spitzenpegelerfassung führt dabei in der Wiedergabe zu einem unnatürlichen Klangbild.¹⁵ Die meisten Limiter arbeiten mit dieser Technik, da diese, um Signale effizient limitieren zu können, dem Pegelverlauf unmittelbar folgen müssen. Die Durchschnittspegelanalyse (RMS) hingegen führt zu einer lautheitsbezogenen Kompression. Da die Pegelanalyse möglichst den Höreigenschaften des menschlichen Ohres nachempfunden sein sollte, arbeiten RMS-Kompressoren für den Zuhörer angenehmer.¹⁶ Die gängigen, einstellbaren Parameter, welche die Steuerspannung des VCA in der Sidechain beeinflussen, werden im Folgenden erläutert.

Threshold

Der Schwellwert (Threshold) legt fest, ab wann eine Kompression des Eingangssignals einsetzt. Dieser wird meist in dB angegeben. Wird ein Threshold von -10dB gewählt, werden alle darüber liegenden Pegel je nach eingestellten Parametern komprimiert, bei geringerem Pegel bleibt das Signal unberührt.

Ratio

Das Kompressionsverhältnis (Ratio) gibt an, um welches Verhältnis das Signal nach Überschreiten des Threshold reduziert wird. Je höher das Ratio eingestellt ist, desto höher fällt die Pegelreduktion aus. Das Ratio wird bei gängigen Kompressoren mit X:1 angegeben. Der Regelbereich reicht dabei im Normalfall von 1:1 (keine Kompression) bis $\infty:1$ („Brickwall-Limiter“, gleicht dem Abschneiden der Signalspitzen).

¹⁵ Vgl. JOHNSEN (1998), Seite 2

¹⁶ Vgl. JOHNSEN (1998), Seite 3

Attack

Die Einregelzeit (Attack) beschreibt jene Zeit, welche der Kompressor benötigt, um auf eine Pegelerhöhung oberhalb des Schwellenwertes zu reagieren und den gewählten Kompressionsgrad umzusetzen. Hersteller von Dynamikprozessoren geben dabei unterschiedliche Grenzwerte (in Prozent) an, ab denen ein Einregelvorgang in der Attackphase abgeschlossen ist. Einige setzen das Ende der Attackzeit bei 63% der vollen Gain-Reduzierung, andere bei bis zu 100% der Gain-Reduzierung an.¹⁷ Der Hersteller dbx gibt die zeitabhängigen Parameter in eindeutigen dB/s an. Ist die Attackzeit sehr kurz gewählt, werden auch kurze Signalspitzen komprimiert, ist dies nicht gewünscht, muss die Attackzeit erhöht werden. So kann z.B. der Klang einer Snare-Drum durch die Wahl von kurzer oder langer Attackzeit beeinflusst werden: Ist die Zeit länger eingestellt, hört man den Anschlag des Sticks auf dem Fell, bei schnellerer Regelung wird der Anschlag wegkomprimiert und die Snare klingt flacher.

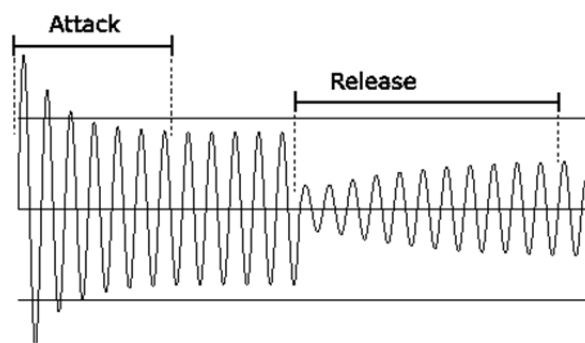


Abb. 3-2: Attack- und Releasephase eines Dynamikprozessors. Quelle: Audacity (2014)

Release

Die Ausregelzeit (Release) gibt an, in welcher Zeit die Verstärkungsrückstellung abgeschlossen wird. Sobald sich das Signal in seiner Amplitude im Arbeitsbereich des Kompressors ändert, wird die Gain-Reduzierung exponentiell verringert und auf den neu geforderten Wert angepasst. Der Vorgang ist also umgekehrt zu dem der Einregelzeit. Dabei muss beachtet werden, dass Aus- als auch Einregelvorgänge gleichermaßen sowohl auf Signaländerungen oberhalb des eingestellten Threshold, als auch auf den Schwellwert an sich reagieren.

3.2 Regelzeitenproblematik

Die meisten heutigen Kompressoren verfügen in ihrer Sidechain über eine diffizile Analyse- und Steuerungsalgorithmik, welche es zulässt, auch komplexe Klänge breitbandig zu komprimieren, ohne dabei unerwünschte Artefakte hinzuzufügen. Sie arbeiten dabei programmabhängig, was bedeutet, dass beispielsweise Audiosignale mit langsamer Amplitudenänderung auch langsamere Regelzeiten in Attack und Release erfahren, als es die eingestellten Parameter suggerieren. Darüber hinaus färben diese sogenannten „musikalischen“ Kompressoren dabei das Audiosignal und verleihen ihm so einen neuen Klangcharakter: Die Kompression verändert sich in Abhängigkeit von den gewählten Regelzeiten,

¹⁷ Vgl. REUTER (1995), Seite 21 ff

die Ratio ist frequenzabhängig, die Regelzeiten variieren je nach Einstellung in Abhängigkeit zueinander und je nach Hersteller werden sogar Obertöne hinzugefügt.¹⁸ Die Firma dbx arbeitet in ihren Kompressoren mit der sogenannten „Auto-Velocity“. Um ein Pumpen und Atmen zu reduzieren und Verzerrungen, welche durch tiefe Frequenzen, die das Steuersignal bei zu schnellen Zeiten „modulieren“, verursacht werden, zu verhindern, wird eine automatische Geschwindigkeitsanpassung der Regelzeiten angewandt.¹⁹ Dies lässt schnelle Regelzeiten zu, ohne dabei das Audiosignal zu verzerren. Die beschriebenen Eigenschaften der Kompressoren lassen einerseits eine flexiblere Handhabung zu, andererseits gleicht in der Arbeitsweise keiner dem eines Anderen, was bei einer Portierung von Parametern zwischen verschiedenen Kompressoren keineswegs zum gleichen klanglichen Ergebnis des Ausgangssignals führen muss.

Technisch angelegte Kompressoren, wie sie auch im eingesetzten Controller BSS-BLU100 zum Einsatz kommen, verzichten weitestgehend auf automatisierte, signal- und parameterabhängige Regelprozesse. Hierbei gilt: Was eingestellt wird, wird auch unverfälscht angewendet. Bei der Bedienung von solch technischen Kompressoren muss besonders auf die eingestellten Regelzeiten geachtet werden, denn durch falsch parametrisierte Attack- oder Releasezeiten entstehen je nach Eingangssignal unerwünschte Artefakte. Ist die gewählte Attackzeit kürzer als die Periodendauer des Signals, kommt es während des Einregelvorgangs im Extremfall zu klanglich hörbaren Artefakten. Durch ein zu lang eingestelltes Release gehen, da die Gain-Reduzierung nur langsam zurück genommen wird, nach Einsetzen eines Regelvorganges durch eine Signalspitze leisere Anteile im Signale verloren. Das Ausklingen von Instrumenten kann durch ein lang gewähltes Release bei hoher Gain-Reduzierung zu deutlich hörbaren Rückstellvorgängen führen. Das hörbare Ereignis bezeichnet man als „Pumpen“. Bei einer sehr hohen Reduzierung eines Signals durch einen Kompressor (ab etwa 10dB) kann z.B. bei einer Schlagzeugspur, je nach Aufnahmequalität, das Grundrauschen der Aufnahme zwischen den Schlägen hervortreten. Dieses Auf- und Abtauchen des Grundrauschens bezeichnet man als „Atmen“. Bei der Schlagzeugspur etwa ließe sich dies durch ein längeres Release vermindern. Es passiert leicht, dass Instrumente durch unsachgemäße Bedienung von Kompressoren in ihrer Spieldynamik eingeschränkt werden und ihr Klang dadurch unnatürlich wirkt. In der Musikproduktion werden diese Eigenschaften des Kompressors für die Verfremdung der Signale durchaus auch kreativ genutzt. Bei der Kompression komplexer Klänge, wie der Summenkompression -zwecks einfacher Dynamikeinschränkung- gilt es hingegen, die Bildung von Artefakten so gering wie möglich zu halten. Die Artefaktbildung während des Einregelvorgangs hängt von der Frequenz des Nutzsignals ab. Das bedeutet, dass eine artefaktfreie Summenkompression mittels Breitbandkompressor nicht möglich ist. Bei hohen Frequenzen führen zu lange Einregelvorgänge dazu, dass nicht alle Signalanteile erfasst werden: Wird die Attackzeit entsprechend kurz gewählt, kommt es bei tieferen Frequenzen, deren Periodendauer unter der

¹⁸ Vgl. KORNEXL, Seite 91ff

¹⁹ Vgl. DBX WHITE PAPER (1998), Seite 2

Einregelzeit liegt, zu nichtlinearen Verzerrungen.²⁰ Diese machen sich durch Knackstörungen bemerkbar. Abbildung 3-3 stellt die genannte Problematik dar.

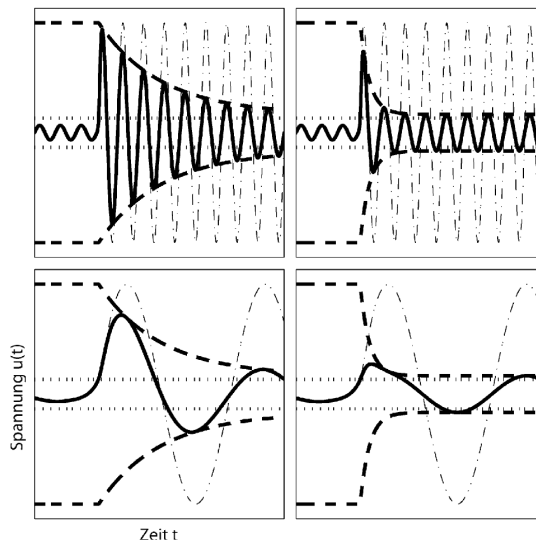


Abb. 3-3: Auswirkungen durch zu lange (links) oder kurze (rechts) Regelzeiten auf hohe (oben) oder tiefe (unten) Frequenzen.
Quelle: Weinzierl (2008), Seite 735

Die geschilderten Probleme, welche falsch-parametrisierte Regelzeiten verursachen können, lassen sich verringern, indem das zu bearbeitende Signal in einzelne Frequenzbereiche aufgeteilt und getrennt geregelt wird. Hohe Frequenzen können über kurze und tiefe über lange Regelzeiten kontrolliert werden.²¹ Eine weitere Möglichkeit bilden Breitbandkompressoren, die mit einer Look-Ahead-Funktion ausgestattet sind. So lässt sich die Bildung von Artefakten im tieffrequenten Bereich verringern, während gleichzeitig hochfrequente Anteile erfasst und komprimiert werden. Durch die Look-Ahead-Funktion eines Kompressors wird das Eingangssignal gegenüber dem Steuersignal verzögert. Ist die Attackzeit nicht länger als die Verzögerung, können Transienten wirkungsvoll erfasst und hörbare, reaktionszeitbedingte Artefakte verringert werden.²² Manche Kompressoren sind darüber hinaus mit einer wählbaren sogenannten „Knee“-Funktion ausgestattet. Durch die Soft-Knee-Einstellung lassen sich Knackstörungen, bzw. Verzerrungen, welche aufgrund zu kurzer Regelzeiten entstehen, reduzieren. Das Signal wird bereits vor dem Erreichen des Schwellwertes allmählich komprimiert. Dabei steigt das Kompressionsverhältnis sukzessive von 1:1 auf das eingestellte Verhältnis an. Dies sorgt für einen weichen Kompressionseinstieg. Bei besonders hoher Komprimierung kann diese Funktion also von Vorteil sein, da der Übergang unauffälliger gelingt als bei einer prompt einsetzenden Kompression.

3.3 Begrenzer (Limiter)

Der Limiter gehört ebenso zu der Familie der Dynamikprozessoren und sein Funktionsprinzip ist dem des Kompressors sehr ähnlich. Die Aufgabe eines Limiters besteht jedoch nicht in der Kompression, sondern

²⁰ Vgl. DICKREITER(2008), Seite 332

²¹ Auch wenn die sog. Multibandkompressoren nach http://www.pilgrimstudio.ch/Kompression_Teil_1.pdf zu klanglich negativen Auswirkungen bzgl. Phasenverschiebungen und Frequenzspektrum führen können.

²² WEINZIERL (2008), Seite 736

in der Begrenzung des Nutzsignalpegels. Ab einem sehr hoch gewählten Kompressionsverhältnis von 1:10 bis 1:20 wird ein Kompressor als ein Limiter bezeichnet.²³ Im Idealfall hat das Ratio ein Verhältnis von $\infty:1$. Darüber hinaus unterscheidet sich die Pegelanalyse der Hüllkurve in der Sidechain. Hier wird die Hüllkurve aus dem Spitzenpegelwert und nicht aus dem RMS-Pegelwert gebildet.

Liegt in einem Audiosystem ein Signal an, welches durch zu hohen Pegel außerhalb des Arbeitsbereiches des Systems liegt, entsteht in diesem ein nichtlineares Verhalten: das Ausgangssignal folgt nicht mehr dem Eingangssignal. Dadurch kommt es zu nichtlinearen Verzerrungen, welche auch im sogenannten Klirrfaktor angegeben werden. Durch den Einsatz eines Limiters wird das Signal in Höhe des eingestellten Threshold begrenzt und soll diesen, unabhängig vom Eingangspegel, nicht überschreiten. Ein Übersteuern des Systems wird so vermieden. In einer den Endstufen vorgeschalteten Vorstufe dient diese Begrenzung vor allem dem Schutz der Lautsprecher vor zu hoher Belastung und kann so deren Zerstörung vorbeugen. Neben Limitern, die das Signal in ihrer Amplitude bedämpfen, gibt es auch solche, die es beschneiden. Die sogenannten Clip-Limiter gibt es in zwei Varianten: Hardclip-Limiter erzeugen im Spannungsverlauf an der Grenze des Thresholds Verzerrungen in Form von Obertönen; Softclip-Limiter hingegen runden diese Kante ab, wodurch das Maß an Verzerrungen geringer ausfällt. Die Wirkungsweise der drei vorgestellten Limiter-Typen ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

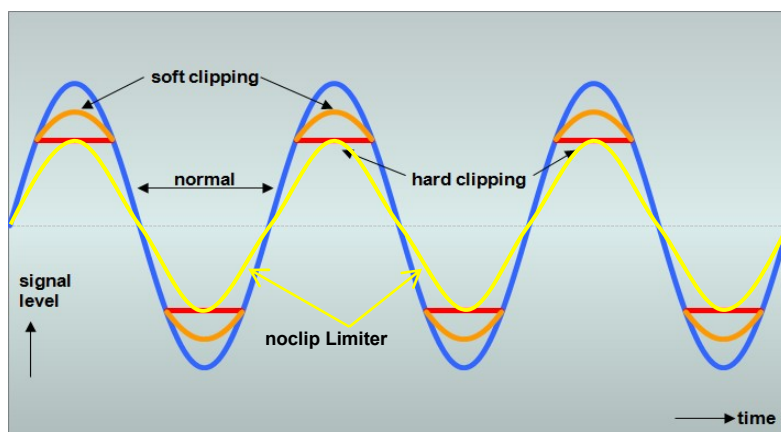


Abb. 3-4: Wirkungsweise der verschiedenen Limitertypen auf den Amplitudenverlauf: noclip(Gelb), Soft Clipping(Orange), Hard Clipping(Rot)²⁴

Clip-Limiter lassen eine höhere Leistung zu als dämpfende Limiter. Im Kapitel 7 „Adaptieren der Klangabstimmung des G1-Soundsystems“ und im Kapitel 8 „Auswertung und Optimierungsansatz bestehender Kompressor-/Limiter-Parameter“ wird detaillierter auf relevante Eigenschaften von Limitern eingegangen.

²³ Vgl. GÖRNE (2011), Seite 359

²⁴ Quelle: In Anlehnung an: <http://www.howtolicenseyourmusic.com/blog/how-to-master-your-tracks-yourself>

4 Prinzipielle Ansätze einer Delay-Architektur

4.1 Mehrwegesystem

Da eine hochwertige, laute und verzerrungsarme Musikwiedergabe über den hörbaren Frequenzbereich des menschlichen Gehörs mit nur einem Lautsprecher nahezu nicht möglich ist, gilt es, den wiederzugebenden Frequenzbereich auf mehrere Lautsprecher aufzuteilen. Bei der Einkanal-Wiedergabe treten Probleme wie das vermehrte Auftreten von Partialschwingungen und die zunehmende Bündelung der abgegebenen Schallwellen zu hohen Frequenzen hin auf. Bei der Wiedergabe zu tiefen Frequenzen hin kommt ein einzelner Lautsprecher schnell an seine physikalischen Grenzen. In einem Drei-Wege-System wird der gesamte Frequenzbereich, aktiv oder passiv getrennt, auf drei für ihren Wiedergabebereich optimierte Lautsprecher aufgeteilt. Dies verringert die Problematiken eines Systems mit nur einem Lautsprecher, bringt jedoch andere Nachteile, wie Betragsfrequenzgangfehler, Phasenfehler, Zeitfehler und Richtwirkungssprünge, mit sich. Im Folgenden werden die Gründe für die Probleme der Ein-Wege-Wiedergabe knapp erläutert und anschließend auf die technisch benötigten Mittel für die Umsetzung eines Mehr-Wegesystems und die daraus resultierenden Problematiken eingegangen.

Solange der Membrandurchmesser kleiner als die Wellenlänge der zu übertragenden Frequenz ist, strahlt der Lautsprecher kugelförmige Schallwellen ab. Ist der Membrandurchmesser größer, so beginnt der Lautsprecher die abstrahlenden Schallwellen zu bündeln, d.h. seine Richtwirkung setzt ein. Die Gründe hierfür liegen im Prinzip der Bauart. Durch die Größe der Membran besitzt diese ein gewisses Maß an Trägheit, was dazu führt, dass mit steigender Frequenz nur noch die in der Nähe der Schwingspule befindlichen Bereiche bewegt werden. Es kommt zu konzentrischen Biegeschwingungen und einer daraus resultierenden, komplizierten Schwingungsverteilung, welche sich negativ auf den Frequenzgang bzw. die Richtcharakteristik auswirken.²⁵ Bei dünnen und steifen Membranen kommt es durch die steife Kopplung der Membran mit dem Schwingspulenträger zu Partial- und Eigenschwingungen in der Membranoberfläche und dem Schwingspulenträger.²⁶ Durch die Abnahme der Schallleistung abseits der Achse des Chassis verringert sich der Hörbereich. Auch die frequenzabhängige Energieverteilung im Raum „das Leistungsdichtespektrum“ verliert an Homogenität. Der Klirrfaktor und die akustische Bündelung hoher Frequenzen sind der Grund für die Entwicklung von Teilfrequenz-optimierten Lautsprechern.²⁷

²⁵ Vgl. DICKREITER(2008), Seite 172

²⁶ Vgl. PFLEIDERER (1990), Seite 80

²⁷ Vgl. PFLEIDERER (1990), Seite 80

4.1.1 Filter

In der Audiotechnik lassen sich Signale durch Filter auf verschiedene Arten modellieren. Neben Klangsynthese, Störungsunterdrückung und Signalaufbereitung wird nach der Erläuterung der Funktionsweise von Filtern im Folgenden auf die für die vorliegende Arbeit relevante Klanggestaltung sowie Frequenztrennung von Signalen per Filter eingegangen.

Die grundlegenden Filtertypen, wie sie auch im Versuchsfahrzeug zum Einsatz kommen, sind Tiefpass-, Hochpass- und Bandpass/Bandsperre-Filter. Der Wirkbereich wird über ihre Grenzfrequenz und die Wahl der Flankensteilheit definiert. Ein Bandpass besteht aus einem kombinierten Tief- und Hochpass. Ein analoges Tiefpassfilter in seiner einfachsten Form wird aus einem simplen RC-Glied aufgebaut (Filter 1. Ordnung). Dieser lässt tiefe Frequenzen passieren, während hohe gesperrt werden. Durch die Wahl einer entsprechenden Kapazität wird die Grenzfrequenz festgelegt. Die Grenzfrequenz beschreibt den Punkt, an dem das Wirken der Schaltung den Pegel des Signals um 3dB, bzw. auf 70,7% der ursprünglichen Spannung, abgesenkt hat. Dieser Bereich wird auch als Übergangsbereich bezeichnet. Von dort an sinkt der Pegel um 6dB pro Oktave, bzw. $n * 20\text{dB}$ pro Dekade (n steht für die Filter-Ordnung).²⁸ Den Wirkbereich des Filters nennt man auch Sperrbereich; der Durchlassbereich ist der Bereich, in dem die Amplitude unverändert bleibt. Durch die Kapazität des Filters entsteht eine Verzögerung des Signals. Bei einem Filter 1. Ordnung ist das Eingangs- zum Ausgangssignal an der Grenzfrequenz um 45° phasenverschoben. Für jede höhere Ordnung kommen weitere 45° hinzu. Dies hat Auswirkungen auf die Gruppenlaufzeit eines Systems und muss, um Kammfiltereffekte bei der Gestaltung von Frequenzweichen zu vermeiden, berücksichtigt werden. Nutzt man in einer Frequenzweiche z.B. zwei Filter 4. Ordnung im Übergangsbereich, addieren sich $4 \times 45^\circ$ vom Tiefpass und $4 \times 45^\circ$ vom Hochpass zu 360° , was in Gleichphasigkeit resultiert. Kombiniert man einen Tiefpass 2. Ordnung mit einem Hochpass 2. Ordnung, so muss zum Erreichen von Gleichphasigkeit die Phase bei einem der beiden Kanäle um 180° invertiert werden.

In den vergangenen Jahrzehnten sind Filter mit verschiedenen Charakteristiken entwickelt worden. Diese unterscheiden sich in ihrer Übertragungsfunktion und weisen divergente Verhaltensweisen im Amplitudenverlauf sowie im Zeitverhalten auf. Im jetzigen G1 kommen ausschließlich sogenannte Butterworth-Filter (BW), benannt nach dem Physiker Stephen Butterworth, zum Einsatz. Dieses Filter weist als Haupteigenschaften einen flachen Dämpfungsverlauf im Durchlassbereich, sowie eine monoton steigende Dämpfung im Sperrbereich auf. Als nachteilig im Frequenzweicheneinsatz weist sich die geringe Flankensteilheit im Übergangsbereich aus, welche dort in einem nicht linearen Betragsfrequenzgang resultiert.²⁹ Außerdem sind die Gruppenlaufzeit und der Phasenverlauf frequenzabhängig, worauf im Abschnitt 4.1.3 „Gruppenlaufzeit digitaler Filter“ näher eingegangen wird.

²⁸ Vgl. SENGPIEL (2012), Seite 1

²⁹ Vgl. DELLSPERGER (2004), Seite 29

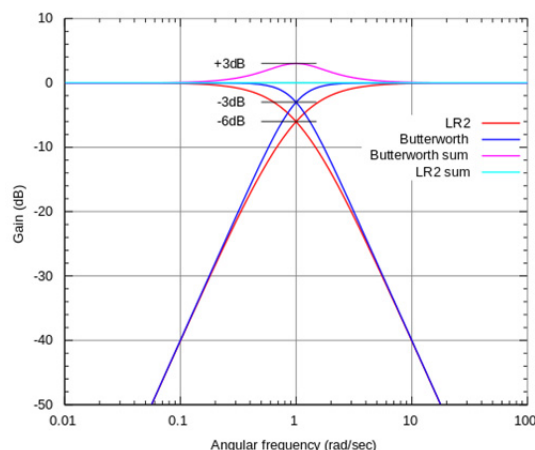


Abb. 4-1: Vergleich von Betragsfrequenzgang Butterworth und Linkwitz-Riley, Quelle: Wikipedia³⁰

In Abbildung 4-1 ist neben dem Betragsfrequenzgang des Filters mit Butterworth-Charakteristik auch der eines Linkwitz-Riley (LR) zu sehen. Dieser weist im Übergangsbereich keine Amplitudenerhöhung auf, fällt dafür aber auch flacher ab. Ein Linkwitz-Riley Filter 2. Ordnung entsteht durch die Zusammenschaltung zweier Butterworth Filter. Je steiler ein LR- oder BW-Filter ausgelegt ist, desto höher ist die Gruppenlaufzeit des Filters. Aus diesem Grund ist von der Anwendung zu steiler Filter (oberhalb 24dB Oktave) in High-End Soundsystemen abzusehen.³¹ Ein neuerer Filtertyp mit den Eigenschaften eines LR-Filters, allerdings mit 36dB Oktave, ist das Neville-Thiele-Method-Filter (NTM). Hier wird ein sogenanntes notch-Filter -eine sehr enge Bandsperre- nahe der Grenzfrequenz eines LR-4 angesetzt, was in einer höheren Flankensteilheit des Filters resultiert. Dieser Filtertyp steht auch im BSS-BLU100 zur Auswahl und gilt nach dem LR als neuer Anwärter auf den Titel des meistgenutzten Filters.³² Bei der Wahl der Trennfrequenz und Ordnung des Filters sollte auf die Frequenzgänge der Lautsprecher-Chassis, bzw. deren eigener konstruktionsbedingter Filterwirkung, Rücksicht genommen werden. Liegt bei einem Tieftönlautsprecher die Trennfrequenz zum Mitteltönlautsprecher zu hoch und/oder die Steilheit des Filters ist geringer als die Lautsprechereigene, kann der geforderte Verlauf des „Frequenzweichen-Pfades“ nicht erreicht werden und die Summierung der einzelnen Wege führt zu einem möglicherweise ungewünschten Betragsfrequenzgang.³³

Für die Wiedergabe im Fahrzeug, aufgrund der festen Sitzpositionen und des geringen Hörabstandes nur bedingt relevant, aber dennoch kurz erwähnt, sei die Problematik der Richtwirkungssprünge. Aufgrund der zuvor erläuterten zunehmenden Richtwirkung zu hohen Frequenzen hin kommt es bei falscher Abstimmung und Komponentenwahl eines Lautsprechers und seiner Frequenzweiche im Bereich der Übernahmefrequenz in seinem Hörfeld zu Richtwirkungssprüngen. Während der Tieftöner bereits gebündelt abstrahlt, ist der Hochtöner im Vergleich zur Wellenlänge klein bemessen und strahlt daher ungebündelt ab. Dies hat zur Folge, dass der Hochtönlautsprecher aufgrund

³⁰ Online im Internet: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Linkwitz_vs_Butterworth.svg

³¹ Mehr zur Wahrnehmung von Gruppenlaufzeiten in Abschnitt 4.1.3

³² Vgl. BSS AUDIO (2003), Seite 1

³³ Vgl. NUBERT (2013), Seite 51

seiner geringeren Bündelung mit der Entfernung mehr an Schalldruck verliert als der Tieftöner³⁴, wodurch die Klangbalance aus dem Gleichgewicht gerät. Durch falsch gewählte Übergangsfrequenzen kann zudem auch die frequenzabhängige Energieverteilung im Raum nachteilig beeinflusst werden. Liegt die gewählte Trennfrequenz in einem Bereich, in dem der Lautsprecher bereits gebündelter strahlt, beeinflusst dies auch die Energieverteilung im Raum. Der frequenzabhängige Pegelabfall führt zu unterrepräsentierten Frequenzbereichen im Diffusschallfeld und beeinflusst somit das Gesamtklangbild der Wiedergabe. Liegen die Trennfrequenzen in einem Bereich, in dem die Lautsprecher ungerichtet strahlen, ergibt sich eine gleichmäßigere Energieverteilung im Raum.³⁵ In der Praxis würde dies eine erhebliche Anzahl von Lautsprechern voraussetzen, wäre nicht praktikabel und würde zu weiteren Problemen führen.

Bei der Wahl der Trennfrequenz gilt es unter Verwendung einer praxistgerechten Anzahl von Lautsprechern, einen Kompromiss aus linearem Frequenzgang im Direkt- als auch Diffusschallfeld zu finden. Filter niedriger Ordnung führen zu kürzeren Gruppenlaufzeiten, machen Partialschwingungen von Lautsprechern (Off-Band-Noise) jedoch hörbarer und die Summierung weniger linear. Steilere Flanken erlauben eine sauberere Trennung mit geringerer Überlappung der Lautsprecher.

4.1.2 Equalizer

Am Versuchsfahrzeug kommen Equalizertypen mit zwei unterschiedlichen Charakteristiken zum Einsatz und werden wegen ihrer visuellen Formen als Shelving- („Kuhschwanzfilter“) und Bell-Filter („Glockenfilter“, siehe Abb. 4-2) bezeichnet. Shelving-Equalizer verstärken bzw. dämpfen das gesamte Frequenzspektrum ab oder unter einer gewählten Grenzfrequenz. Bell-Filter sind meist als vollparametrische Equalizer ausgelegt und in ihrer Bedienung mittels dreier Parameter sehr flexibel einsetzbar.

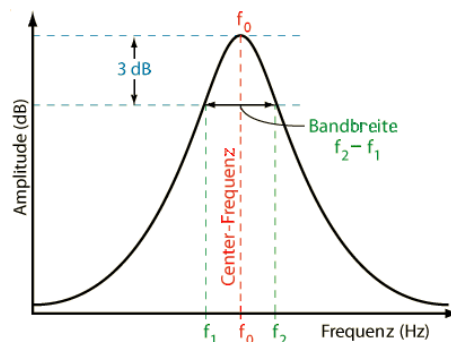


Abb. 4-2: Bell-Filter (Glockenfilter). Quelle: Sengpiel-Audio³⁶

Die Wahl der Mittenfrequenz, die Stärke der Anhebung, bzw. Absenkung, sowie die Bandbreite stehen dabei als Parameter zur Verfügung. Über einen Güte-Regler ist die Breite des Durchlassbereiches und somit auch die Flankensteilheit des Filters wählbar. Dabei gilt: Je größer die Flankensteilheit eines Filters, desto größer sind die Fehler in Ein- und Ausschwingvorgängen von Impulsen.

³⁴ Vgl. SENGPIEL (2014)

³⁵ Vgl. Strassacker (2007)

³⁶ Online im Internet: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-bandwidth.htm>

4.1.3 Gruppenlaufzeit digitaler Filter

Die Gruppenlaufzeit gibt Auskunft über die Zeit, welche ein Signal benötigt, um ein System zu durchlaufen. Dieses System kann ein linear zeitinvariantes System (LZI-System) wie ein Filter, oder auch ein Lautsprecher sein. Ein LZI-System verändert seine Übertragungseigenschaften mit der Zeit nicht, weshalb es als zeitinvariant beschrieben wird. Es gilt als linear, da das durchlaufende Signal im optimalen Arbeitsbereich nur linear verzerrt wird. Verlässt man diesen Bereich, kommt es hingegen zu nichtlinearen Verzerrungen und das Spektrum verändert sich durch das Entstehen neuer Teiltöne auch qualitativ. Die meisten der Studiogeräte erfüllen die Anforderungen an ein LZI-System.³⁷

Beim Passieren eines Filters in Frequenzweichen oder Equalizern kommt es zu ungleichen Laufzeiten spektraler Anteile. Die aufkommenden Nichtlinearitäten, welche aufgrund der ungleichen Impulsverarbeitung entstehen, resultieren laut Hörversuchen von G. Nubert in unpräzisen Mitten und einer trägen Basswiedergabe³⁸, sowie einem undeutlichen Stereo-Effekt mit verwaschener Tiefenstaffelung.³⁹ Verhindern ließe sich dies mit digitalen „Finite Impuls Response“ Filtern (FIR), welche auch im DSP des Panamera implementiert sind, allerdings nicht zum Einsatz kommen. FIR-Filter sind digitale Filter mit linearen Rechenoperation und variabel, sowie komplex in Ihren Möglichkeiten. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen zwei Prinzipien digitaler Filter: Filter dessen Impulsantwort in ihrer Zeit beschränkt ist und solche, deren Impulsantwort theoretisch unendlich lang ist. Erstere haben vor allem den Vorteil, den Betrag des Amplitudenfrequenzgangs unabhängig vom Phasengang des Signals zu beeinflussen. Man nennt sie aufgrund ihrer Eigenschaft der endlichen Länge der Impulsantwort FIR-Filter (Finite Impuls Response). Die Zweiten nennt man mit ihrer theoretisch unendlich langen Impulsantwort IIR-Filter (Infinite Impuls Response). Diese sind weniger rechenaufwändig und werden aufgrund ihres Verhaltens vor allem zur Nachbildung analoger Filter genutzt. Eben diese werden im Versuchsfahrzeug eingesetzt.

Der Ausgangswert eines FIR-Filter berechnet sich aus der Mittelung der Summe von aktuellem und vorherigem Eingangswert. Dabei ist die Mittelung nicht konstant, sondern die einzelnen Werte werden unterschiedlich gewichtet. Die Gewichtung wird durch den Filterkoeffizienten bestimmt. Die Anzahl der Koeffizienten bestimmt die Selektivität, bzw. Ordnung des Filters.⁴⁰ Bei der Wahl symmetrischer Koeffizienten ist sowohl die Gruppenlaufzeit konstant, als auch der Phasengang linear.⁴¹ Je mehr Koeffizienten (Tabs) das Filter beinhaltet, also je selektiver es ausgelegt wird, desto schlechter ist sein Impulsverhalten. Schnelle Werteänderungen haben also lange Ein- bzw. Ausschwingvorgänge zur Folge. Der Grund dafür liegt in der Mittelwertbildung zu Beginn oder zum Ende einer schnellen Wertänderung. Umso tiefer die zu bearbeitende Frequenz liegt, desto mehr Tabs sind notwendig, desto länger ist die

³⁷ Vgl. GÖRNE (2011), Seite 136

³⁸ Vgl. NUBERT (2013), Seite 51

³⁹ Vgl. TENBUSCH (1989), Seite 113

⁴⁰ Vgl. TU WIEN (2010a), Seite 2

⁴¹ Vgl. NEUSCHWANDER (2010), Seite 26

Gruppenlaufzeit und desto höher ist der Rechenaufwand des Filters. Zu beachten ist, dass je nach unterer Grenzfrequenz die Gruppenlaufzeit auf bis zu 50ms ansteigen kann, was bei der Musikwiedergabe im Fahrzeug unkritisch ist, bei einer Videowiedergabe jedoch zu Asynchronität führen würde. Hier müsste die Latenz des Audiosystems über eine Verzögerung des Videosignals ausgeglichen werden.⁴²

Grundsätzlich ist der Aufbau eines IIR-Filters ähnlich dem eines FIR-Filters, jedoch fließen im Gegensatz zu einem FIR-Filter bei der Berechnung eines IIR-Filter zusätzlich zum Eingangssignal auch vorhergegangene Ausgangswerte mit ein. Die Anzahl der Rückkopplungen des Filters werden durch einen weiteren Koeffizienten angegeben und beschreiben seine Ordnung.⁴³ Für eine gleichwertige Ordnung gegenüber der eines FIR-Filters sind weniger Koeffizienten notwendig, daraus resultiert ein geringerer Rechenaufwand. IIR-Filter neigen bei nicht sorgfältiger Auslegung zur Instabilität und bei höherer Ordnung zu einem merklichen Quantisierungsrauschen.⁴⁴

Die Untersuchung von klanglichen Auswirkungen der Laufzeitentzerrung der im Versuchsfahrzeug verwendeten Filter ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, stellt aber ein weiteres interessantes Thema für zukünftige Untersuchungen dar. Dieser Abschnitt sollte auch den Unterschied zu der Gruppenlaufzeit von Lautsprechersystemen mit verschiedenen Schallentstehungsorten (SEO) durch konstruktionsgegebenen Versatz deutlich zu machen, welche im kommenden Kapitel thematisiert werden.

4.1.4 Gruppenlaufzeit eines Mehrwegesystems

Durch den baulichen Versatz der einzelnen Chassis in einem Lautsprechergehäuse kommt es zu unvermeidbaren Laufzeitverzögerungen der aufgeteilten Signalanteile. Die abgestrahlten Schallwellen erreichen zu unterschiedlichen Zeiten das Ohr. Bei der Verwendung einer passiven Frequenzweiche mittels Schaltungstechnik oder digitalen Filtern ohne Laufzeitentzerrung kommt, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ein weiterer zeitlicher Versatz hinzu. In einem Fahrzeug, in dem die Chassis für Bass-, Mittel- und Hochtonwiedergabe und damit die Schallentstehungsorte deutlich weiter auseinander liegen als in einem HiFi-Mehrwegelautsprecher, ist das Zeitverhalten des Systems noch unpräziser und die Auswirkungen des konstruktionsgegebenen Versatzes spürbarer. Der zeitliche Versatz führt von Phasenfehlern bis hin zu Auslöschungen von Frequenzen im Übergangsbereich. Es kommt zu Interferenzen zwischen den einzelnen Chassis, welche auch Auswirkungen auf das Abstrahlverhalten des Lautsprechersystems haben.⁴⁵ Das Resultat sind kammfilterartige Überlagerungen und Auslöschungen im Frequenzband. Außerdem werden, umso weiter sich die Chassis voneinander entfernen, aufgrund des mangelhaften Impulsverhaltens des Lautsprechersystems Phantomschallquellen zunehmend

⁴² Vgl. NUBERT (2013), Seite 51

⁴³ Vgl. TU WIEN (2010b), Seite 2

⁴⁴ Vgl. CURDT (2011), Seite 18

⁴⁵ Vgl. TENBUSCH (1989), Seite 125ff

unschärfer.⁴⁶ Die zeitliche Optimierung kann immer nur für einen Ort durchgeführt werden, andere Orte weisen nach wie vor Interferenzeffekte sowie Phasenprobleme auf. Dabei ist der Frequenzbereich von 100Hz bis 2000Hz als besonders kritisch zu betrachten.⁴⁷ Besonders hörbar werden Phasenfehler bei Impulsen: Da Hoch-, Mittel- und Tieftönlautsprecher zu den entsprechenden Frequenzen eine jeweils unterschiedliche Phasenlage haben, kommt der Direktschall der ersten Wellenfront aufgespalten beim Hörer an. In der Hörpraxis resultiert dies in einer Veränderung der Tiefenstaffelung eines Musikstückes. Instrumente werden in die Tiefe gezogen oder rücken mehr in den Vordergrund. Kleine Kopfbewegungen lassen diese auf der „Bühne“ in der Tiefe wandern. Die Räumlichkeit einer Aufnahme wird so künstlich erhöht, aber auch verfälscht. Nach Pfeleiderer⁴⁸ führt dieses überräumliche Übertragungsverhalten zu einer Abnahme der Transparenz sowie zu unpräzisen und falschen Ortungen in der Musikwiedergabe. Der zeitliche Versatz der Chassis zueinander kann mittels einer aktiven Laufzeitverzögerung in einem Controller wie dem BSS-BLU100 korrigiert werden. Dazu wird bei Bedarf in jedem Kanalpfad das Signal durch ein eingebundenes Zeitverzögerungsglied („Delay“) kontinuierlich zwischengespeichert und nach einem definierten Verzögerungswert in der Signalkette weitergegeben.

Eine Zeitanpassung beeinflusst den Summenfrequenzgang bei Mehrwegesystemen. Übergänge zwischen den Frequenzbereichen der Lautsprecher überlagern sich konstruktiver. Folglich ist es erforderlich, nach einer Zeitanpassung erneut den gesamten Frequenzverlauf zu betrachten, um eventuell entstandene Überhöhungen durch das Ändern der Trennfrequenzen wieder ausgleichen zu können.

4.2 Mehrkanal-Stereofonie

Mehrkanalsysteme bilden in heutigen Haushalten und zunehmend sogar in mobilen Geräten den Standard für die Musik und Filmtönwiedergabe. Wenigstens sind Stereo-Systeme, oft aber auch Surround-Systeme installiert. In dem Projektfahrzeug Panamera ist ein 7.1 Surround System installiert. Die einkanalige Wiedergabe, die Monophonie, ist beschränkt auf einzelne kleine Geräte wie Küchenradios oder Mobiltelefone. Bis in die 1950er Jahre ist die Monophonie die gängige Technik für Abbildung akustischer Signale durch Lautsprecher. Diese Einkanaltechnik hat gegenüber anderen Wiedergabetechniken entscheidende Nachteile: So ist es nicht möglich, mittels eines Lautsprechers verschiedene akustische Signale räumlich aufzuteilen. Dies führt zu einem undifferenzierten Klangbild. Das heißt, es ist schwierig einzelne Schallquellen innerhalb einer Mischung mit z.B. mehreren Instrumenten getrennt zu lokalisieren. Naheliegender ist auch, dass die Räumlichkeit und Fülle einer Mischung geringer ausfallen als bei Mehrkanalwiedergabetechniken.

Durch das zweikanalige Stereofonie-Verfahren wurde das Verteilen von akustischen Signalen auf der Achse zwischen zwei Lautsprechern möglich. Der gewonnene Raum auf der Basis zwischen den

⁴⁶ Vgl. GÖRNE (2011), S. 293

⁴⁷ Vgl. PFLEIDERER (1990), Seite 71

⁴⁸ Vgl. PFLEIDERER (1990), Seite 91

beiden Lautsprechern führt beim geschickten Positionieren der Schallquellen auf ebendieser zu einer erhöhten Durchsichtigkeit, Räumlichkeit und Klangfülle einer Mischung.⁴⁹ Laufzeitdifferenzen zwischen den beiden Lautsprechern führen zu einem räumlichen Schalleindruck eines Signals. Die beschriebenen Nachteile der Monophonie scheinen gelöst, jedoch entstehen aus den Vorteilen neue Probleme. Der Zuhörer muss sich innerhalb der Stereohörfläche in einer bestimmten geometrischen Anordnung zu den Lautsprechern befinden. Nur an diesem Punkt im Raum, dem sogenannten „Sweet-Spot“, finden sich optimale Abhörbedingungen wieder. Dieser befindet sich mit einem Öffnungswinkel von 60° zu den Lautsprechern in der Mitte der Basis. Die sogenannten Phantomschallquellen, welche auf der Lautsprecherbasis mittels Pegel- und/oder Laufzeitdifferenzen positioniert wurden, sind nicht ortsstabil. Nimmt der Zuhörer eine andere Sitzposition ein, so wandern die Phantomschallquellen auf der Lautsprecherbasis mit. Gegenüber Realschallquellen haben diese weniger Präsenz und einen weniger präzisen Hörort. Dies macht deutlich, wie problematisch die differenzierte Wahrnehmung von Audiomaterial in einem Fahrzeug mit 16 Lautsprechern ist. In High-End Soundsystemen wird ein Center-Lautsprecher eingesetzt, welcher nicht nur die Links-Rechts-Balance ausgleicht, sondern auch die Bühnenmitte stabilisieren soll. Die Stereophonie ist eine eindimensionale Technik und lässt keine reale Tiefenstaffelung zu. Bedingt kann man mittels psychoakustischer Maßnahmen einen räumlichen Tiefeneindruck schaffen. Für die Tiefenstaffelung wichtige Parameter sind Lautstärke, Anteil der Erstreflexionen sowie Direkt- und Diffusanteil einer Schallquelle. Um Phantomschallquellen auch im Raum um den Zuhörer herum und nicht nur auf der Basis abbilden zu können und einen einhüllenden Effekt der Wiedergabe zu schaffen, wird erst die Quadrophonie und anschließend die 5.1 Surround Wiedergabetechnik entwickelt. Schon Mitte der 60er Jahre beginnt die Entwicklung dieser Technik „zu Deutsch Raumklang“ in den Dolby Laboratories in San Francisco.

Mittels Surroundtechnologie ist es möglich, Phantomschallquellen im Raum (Hörfeld) des Zuhörers zu positionieren. Das Grundproblem aber bleibt bestehen. Es ist keine ortsstabile räumliche Abbildung von Schallquellen durch phantomschallquellenbasierte Wiedergabe möglich. Das heißt, es gibt nach wie vor nur einen Sweet-Spot, welcher im Zentrum des Hörbereiches liegt. Bei diskretem 5.1 Mehrkanalton gilt es, insgesamt sechs Wege zu speisen. Den LFE-Kanal (Low Frequency Effect) für die Wiedergabe von Basseffekten, die Frontkanäle Links, Center und Rechts sowie Surround Rechts und Surround Links. Durch den hinzugekommenen Center-Kanal auf der Basis zwischen den linken und rechten Frontkanälen ergibt sich eine ortsstabile Mitte, was zu erhöhter Präsenz und Lokalisation der dort positionierten Schallquellen führt. Allerdings führen bereits minimale Kopfbewegungen zu Phasenproblemen und Klangveränderungen von Phantomschallquellen, welche im Raum abgebildet werden sollen. Es gibt weitere Mehrkanaltonverfahren wie 6.1 und 7.1. Bei 6.1. kommt ein weiterer Kanal für Backsurround hinzu, bei 7.1, wie im Porsche Panamera der Fall, zwei weitere.

⁴⁹ Vgl. BLAUERT (2008), Seite 184

4.3 Räumliche Darstellung

Die Illusion der räumlichen Schallwiedergabe wird durch das Verwenden mehrerer Lautsprecher erreicht. Die virtuellen Schallquellen, welche sich durch die Schallfeldüberlagerung zwischen zwei oder mehr Lautsprechern bilden, sind maßgeblich für diese Illusion verantwortlich. Der Ort der Phantomschallquellen wird in der Aufnahme- als auch Wiedergabetechnik durch Pegel-, und/oder Laufzeitdifferenzen festgelegt. Bei Pegeldifferenzen zwischen zwei Lautsprechern lenkt die fiktive Schallquelle auf der Basis von der Mitte seitlich aus. Nach Wittek und Theile wandert die Schallquelle mit 7,5%/dB in Richtung des lauterer Lautsprechers, bis sie bei etwa 12 – 15 dB direkt bei ihm lokalisiert wird.⁵⁰ Die Lokalisationsschärfe der Phantomschallquellen nimmt dabei mit wachsender Pegeldifferenz zu. Bei Zeitdifferenzen beträgt der Auslenkungskoeffizient nach Wittek und Theile 13%/0,1ms. Wie in Abbildung 4-3 hervorgeht, bleibt das Signal bis 0,6ms (ca. 20cm) Auslenkung dabei ohne Klangverfärbungen, ab etwa 1ms kommt es durch Kammfiltereffekte zu frequenzabhängigen Klangverfärbungen. Durch Zeitdifferenzen nimmt die Richtungsstabilität/Lokalisationsschärfe der Phantomschallquellen ab. Dies geschieht frequenzabhängig. Für das menschliche Gehör sind zu hohen Frequenzen hin Pegelunterschiede oder zu tiefen Frequenzen hin das erste Eintreffen der Schallfront ein Hinweis auf die Lokalität der Schallquelle. Für Schallwellen, welche durch Reflexionen oder weitere Lautsprecher im Fahrzeug etwa 1 bis 30ms verzögert zum Direktschall am Hörplatz eintreffen, gilt der Präzedenzeffekt oder auch das „Gesetz der ersten Wellenfront“⁵¹. Dies besagt, dass der zuerst eintreffende Schall den Richtungseindruck vorgibt, auch wenn der danach folgende Schall deutlich lauter ist. Erst ab 40 bis 50ms Verzögerung nimmt man den Schall getrennt wahr und der Echoeffekt setzt ein.

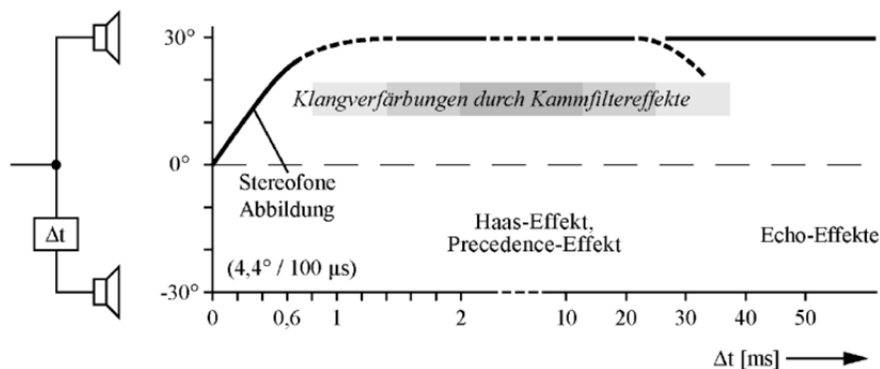


Abb. 4-3: Wirkung der Laufzeitdifferenz. Quelle: Dickreiter (2008), Seite 190

Durch unsymmetrische Anordnung der Lautsprecher zur Hörposition, wie es in einem Fahrzeug der Fall ist, entstehen durch die zuvor genannten Differenzen Verzerrungen in der Richtungsdarstellung. Das Auswandern und in die Breite ziehen von Phantomschallquellen kann durch Maßnahmen, welche in Kapitel 9 „Untersuchungen zu Delaystrukturen“ erläutert und erprobt werden, vermindert werden.

⁵⁰ Vgl. WITTEK, THEILE (2001), Seite 14

⁵¹ z. B. CREMER und MÜLLER 1978

Im Raum eines Fahrzeuges befindet man sich stets im Direktfeld des Schallfeldes. Hier ist der Direktschallpegel größer als der des diffusen Schallfeldes. Das diffuse Schallfeld wird durch die Eigenschaften des Wiedergaberaums, also den Reflexionen, dem Absorptionsverhalten und seiner Größe bestimmt. Die Grenze zwischen diesen beiden Schallfeldern wird durch den Hallradius beschrieben. Der Raum trägt maßgeblich zum Klangeindruck von Lautsprechern bei. Klangbestimmend für den Raum sind jedoch nicht der Direktschall oder der Nachhall, sondern die ersten schallstarken Reflexionen.⁵² „Die ersten schallstarken Reflexionen bestimmen in allen Hörräumen entscheidend die als Gesamteindruck wahrgenommenen Sinnesempfindungen wie Lautstärke, Räumlichkeit, Entfernung, Deutlichkeit und Natürlichkeit und damit die Hörqualität.“⁵³ Auch nach Görne tragen die frühen Reflexionen erheblich zum Klangeindruck bei.⁵⁴

⁵² Vgl. PFLEIDERER, Seite 104

⁵³ a.a.O., Seite 108

⁵⁴ Vgl. GÖRNE, Seite 88

5 Parameter für die Bewertung und Interpretation klanglicher Eigenschaften

5.1 Messparameter

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Messparameter, welche für die Interpretation und das Erreichen und Erarbeiten der vorgegebenen Ziele und Themen notwendig sind, genannt.

Frequenzgang

Der Frequenzgang gibt Auskunft über das Lautstärkeverhalten über einen bestimmten Frequenzbereiche eines Lautsprechers. Breitbandige Abweichungen sind dabei akustisch deutlich auffälliger als schmalbandige. Bei der Bewertung von Frequenzgängen spielen die Kriterien „Linearität“ und „Ausgewogenheit“ eine vorrangige Rolle. Bestimmt wird der Frequenzgang eines Lautsprechers auf seiner Hauptabstrahlachse, also bei 0°. Gemessen wird dabei im Freifeld. Aus dem ermittelten Frequenzgang lässt sich allerdings nicht unter Garantie feststellen, ob der Lautsprecher einen besonders neutralen oder unverfälschten Klang hat. Die Abstrahlcharakteristik variiert je nach Frequenz und Lautsprecher, wodurch sich auch das entstehende Diffusfeld, welches das Direktfeld in einem Raum überlagert, frequenzabhängig ändert und somit den Klang des Lautsprechers beeinflusst. Die Linearität eines Frequenzganges beschreibt dabei Schwankungen innerhalb kleiner Frequenzbereiche. Nichtlineare Frequenzbereiche außerhalb des für das menschliche Gehör empfindlichen Bereichs zwischen etwa 400 Hertz und 6 Kilohertz sind dabei unkritischer zu sehen, als solche in dem für das Gehör so empfindlichen Bereichs. Der Ausgleich solcher unlinearen Frequenzbereiche ist aufgrund derer Schmalbandigkeit mit passiver Schaltungstechnik kaum zu bewerkstelligen. Des Weiteren bedarf es in diesem Fall aufgrund von Serienschwankungen einer individuellen Entzerrung eines jeden Lautsprechers.⁵⁵ Die Ausgewogenheit eines Lautsprechers, welche sich aus dem gemessenen Frequenzgang ableiten lässt, beschreibt die Verhältnisse der verschiedenen breitbandigen Frequenzbereiche „Bass, Mitten und Höhen“ zueinander. Um ein möglichst natürliches und ausgewogenes Klangbild zu erreichen, sollten diese Frequenzbereiche gleichermaßen ausgeprägt sein. Abweichungen sind hier wahrnehmbarer als Unlinearitäten im Frequenzgang, lassen sich aber auch leichter durch entsprechende Maßnahmen wie Equalizer oder Korrekturschaltungen ausgleichen.

Übertragungsbereich

Der Übertragungsbereich gibt den maximalen Frequenzbereich an, welchen der Lautsprecher wiedergeben kann.

⁵⁵ Vgl. TIMMERMANN (2011), Seite 80

Belastbarkeit

Die Belastbarkeit gibt an, mit welcher Leistung ein Lautsprecher betrieben werden kann, ohne durch Überhitzung (Dauerbelastbarkeit) oder zu große Auslenkung (Spitzenbelastbarkeit) zerstört zu werden.

Rundstrahlverhalten

Das Rundstrahlverhalten gibt Auskunft über das Bündelungsmaß eines Lautsprechers. Dabei ist entscheidend, wie groß die Membranfläche im Verhältnis zur übertragenden Frequenz ist. Das Bündelungsmaß eines Konus-Lautsprechers steigt mit der zu übertragenden Frequenz. Tieffrequente Signalanteile werden kugelförmig abgestrahlt. Auch bestimmte Membranmaterialien und Membrangeometrien beeinflussen das Abstrahlverhalten.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Lautsprechers gibt an, wie laut dieser bei einer bestimmten zugeführten Leistung ist. Angegeben wird dieser Wert in dB W/m. Einem Lautsprecher wird ein Messsignal mit 1 Watt (2,83 Volt bei einem 8 Ohm Lautsprecher) zugeführt und in einem Meter Abstand auf Achse des Lautsprechers seine Lautstärke in dB/SPL gemessen.

Impedanz

Die Impedanz gibt Auskunft über den ohmschen Widerstand eines Lautsprechers. Bei elektrodynamischen Lautsprechern ist dieser frequenzabhängig. Über einen über die Frequenz gemessenen Impedanzverlauf lassen sich Rückschlüsse auf die Resonanzfrequenz eines Lautsprechers sowie den frequenzabhängigen Leistungsbedarf schließen. Bestimmt wird dieser hauptsächlich durch die Induktivität der Schwingspule, dem Drahtwiderstand sowie der Gegeninduktion der Schwingspule des Lautsprechers. Das Maximum der Gegeninduktion befindet sich in der Resonanzfrequenz, da hier die Auslenkung der Membran am größten ist. Das Impedanz Minimum darf dabei nach der HiFi-Norm DIN 45570 maximal 20% unter dem Nennwert der angegebenen Impedanz des Lautsprechers liegen.

Sprungantwort

Anhand der Sprungantwort lässt sich das zeitliche Übertragungsverhalten eines Systems betrachten. Auch gibt die Sprungantwort Auskunft über das Impulsverhalten eines Lautsprechers. Dieses unterscheidet sich je nach Dimensionierung und verwendeten Materialien der Lautsprecher.

Lineare Verzerrungen

Bestehende Frequenzen werden angehoben oder abgesenkt, die Phasenlage kann sich ändern. Sogenannte LZI-Systeme (lineare zeitinvariante) welche Schwingungen nur in Amplitude und Phase ändern, kommen in Tonstudios zum Einsatz und erzeugen lineare Verzerrungen (z.B. Equalizer). Ausgenommen ist hiervon der Klirrfaktor in den LZI-Systemen. Dieser sorgt für geringe, nichtlineare Verzerrungen.

Nichtlineare Verzerrungen

Bei nichtlinearen Verzerrungen handelt es sich um qualitative Änderungen des Signals. Es entstehen neue Teiltöne. Limiter, Kompressoren, Filter, Endstufen und Lautsprecher sind Systeme die nichtlineare Verzerrungen erzeugen.

Klirrfaktor

Der Klirrfaktor ist eine Maßzahl für die Nichtlinearität eines Systems. Er berechnet sich aus der Summe der Leistung der nicht im Eingang enthaltenen Frequenzen, geteilt durch die Leistung der Grundfrequenz. Durch Verzerrung generierte Obertöne werden mit k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , usw. bezeichnet. Die geradzahlig Harmonischen werden als angenehmer und nicht so störend empfunden, als es bei den ungeradzahlig der Fall ist.⁵⁶

5.2 Subjektive akustische Qualitätsparameter

Für die klangliche Beurteilung der Wiedergabequalität von Sprach- und Musikprogrammen werden verschiedene Termini verwendet, welche nachfolgend in ihrer Bedeutung erläutert werden sollen. „Hörereignisse sind komplexe Sinneswahrnehmungen und erfordern differenzierte Parameter zur Bewertung spezieller Qualitätsaspekte“, so Wolfgang Hoeg⁵⁷. Für diese Arbeit wird nach einer Standardisierung für die Beurteilung von Qualitätsveränderungen einer Wiedergabesituation in Räumen über Lautsprechersysteme gesucht. Nach Rücksprache mit W. Hoeg⁵⁸ fiel der Entschluss, die Bewertung anhand der Termini, welche von der European Broadcast Union (EBU) in der Tech3286⁵⁹ festgelegt wurden, durchzuführen. Ursprünglich sind diese entwickelt für die Bewertung von klassischen Musikprogramm; Sie sind laut Hoeg aber auch bereits für die Bewertung von Lautsprechern und Räumen verwendet worden. Eine Standardisierung, zugeschnitten auf kleine Räume oder sogar Fahrzeuginnenräume gibt es nicht, so Hoeg.

⁵⁶ Vgl. SENGPIEL (2008), Seite 1

⁵⁷ HOEG (2008), Seite 1169

⁵⁸ Wolfgang Hoeg war an zahlreichen Standardisierungen beteiligt, u.A. in der OIRT, EBU, ITU-R, EUREKA

⁵⁹ <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3286.pdf>, Tabelle ins Deutsche übersetzt durch W. Hoeg

Hauptparameter	Teilparameter	Bestimmende Faktoren
Raumeindruck	Homogenität des Raumschalls Empfundene Raumgröße Tiefenstaffelung	Nachhallzeit T Direktschallmaß Frequenzgang der Nachhallzeit Richtungsdiffusität
Stereophoner Eindruck	Richtungsgleichgewicht Richtungsstabilität Abbildungsbreite Lokalisierungsschärfe	Pegeldifferenzen Phasen-/Laufzeitdifferenzen
Durchsichtigkeit	Registerdurchsichtigkeit Zeitdurchsichtigkeit Textverständlichkeit	Deutlichkeit Möglichkeit einzelne Schallquellen eines Klangkörpers getrennt zu lokalisieren und zu verfolgen Silbenverständlichkeit Raumakustische Diffusität
Akustisches Gleichgewicht	Lautstärkegleichgewicht Dynamikbereich Klangfarbengleichgewicht	Dynamik, Kompression, Limitierung
Klangfarbe	Klangfarbe Direktschall Klangfarbe Raumschall	Amplitudenfrequenzgang Nichtlineare Verzerrungen
Störgeräusche	Akustische Störwirkungen Raumakustische Irregularien	Klimageräusche, Wind-, Motor-, Abrollgeräusche Resonanzen, Reflektionen
Akustischer Gesamteindruck		

Tabelle 5-1: Subjektive akustische Qualitätsparameter. Quelle: In Anlehnung an EBU Tech3286⁶⁰

Die Tabelle wurde ohne Veränderung der Hauptparameter um weitere, bezüglich der Fragestellung zur Wiedergabe in Fahrzeugen nützliche, ergänzt, andere Teilparameter wurden entfernt.

⁶⁰ EBU Tech3286, Online im Internet: <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3286.pdf>

6 Versuchsaufbau

6.1 Fahrzeug

Das Fahrzeug, an dem die Untersuchungen zu den Themen der Bachelorarbeit durchgeführt wurden, stand dem Autor über den gesamten Zeitraum beinahe lückenlos zur vollen Verfügung. Der Porsche Panamera ist eine Oberklasse Limousine mit vier Sitzplätzen. Es stehen vier unterschiedliche Audiosysteme zur Auswahl, Basis-Sound (10 Lautsprecher (LS)), Soundpackage+(11 LS), BOSE® Surround Soundsystem(14 LS) und das Burmester® High-End Surround Soundsystem(16 LS). Ziel der Arbeit ist die Parameteroptimierung des High-End Surround Soundsystems, mit dem das Fahrzeug ausgestattet ist. Als vielseitiger Zuspeler (USB, CD, DAB, AUX), Steuerzentrale und MOST-Master dient das PCM. Alle 16 Lautsprecherkanäle werden aktiv im DSP getrennt und einzeln bearbeitet. Anschließend werden die Chassis von den speziell für den Automotive-Bereich entwickelten Endstufen TDA7575b der Firma STMicroelectronics angetrieben. Zwischen den Geräten wird verlustfrei über das zu Anfang der Arbeit beschriebene MOST25 Netzwerk kommuniziert.

6.1.1 DSP Verstärker

Kernstück der Audiosignalbearbeitung und Verteilung ist der DSP-Verstärker. Eingangsseitig werden die ankommenden MOST Audio- und Steuerdaten durch den Front Optical Transmitter (FOT) von optischen in elektrische Signale gewandelt. Ein Integrated Network Interface Controller (INIC) verarbeitet die relevanten Daten und reicht diese weiter. Die sich in der Signalkette vor den Endstufen befindlichen DSPs verarbeiten die Audiosignale in 32bit Auflösung. Ein Blackfin BF534 (16-Bit-Festkomma-DSP) fungiert als Controller und SPI-Master (Serial Peripheral Interface) für den Sharc ADSP 21363 (32-Bit-Gleitkomma-DSP), welcher die Prozessierung der Audiosignale übernimmt, zwei AD193x dienen als D/A Wandler. All diese Prozessoren stammen von der Firma Analog Devices. Im Flash-Speicher wird der Programmcode abgelegt und weitere Datensätze, wie z.B. Soundsets. Das EEPROM dient als Festspeicher und ist SPI-Slave vom Blackfin. Für Diagnose und Stromüberwachungszwecke ist ein weiterer Prozessor, ein Peripheral Controller (PerC), installiert. In den Mittel-, und Hochtonkanälen sind zusätzlich aktive, analoge Filter installiert. Die bereits erwähnten Endstufen TDA7575B (fünf) und TDA8596 (zwei) treiben die Lautsprecher einzeln an. Die Endstufen arbeiten nach dem Class-AB Konzept im dual-Bridge(TDA7575B), bzw. quad-Bridge(TDA8596) Modus nach dem BTL-Prinzip (Bridged Transless). Aus Platz-, Gewichts- und Kostengründen und insbesondere wegen der geringen Bordnetzspannung werden vor allem Endstufen im Automotive-Bereich nach diesem Prinzip konstruiert. Die Bordnetzspannung limitiert die maximal in den Lautsprechern umsetzbare elektrische Leistung (U^2/R). Durch die Verwendung von zwei Verstärkern in Brückenschaltung wird die maximale Spannungsamplitude verdoppelt. Eine Verdopplung der Ausgangsspannung entspricht einer

Vervierfachung der Leistung im Verstärker. Zusätzlich lassen sich die Ausgänge der TDA7575B parallel schalten und die Endstufe wird somit 10Ω stabil, was bei gleichbleibender Spannung zu einem erhöhtem Stromfluss führt und in höherer Leistung resultiert. Die Endstufen liefern unter 14,4V Versorgungsspannung an 10Ω 150W bei 10% THD (bei 84W 3% THD)⁶¹. Die gemessenen Ausgangsspannungen der einzelnen Kanäle finden sich in einem Excel-Sheet auf der CD im Anhang.⁶² Die Aufteilung der Chassis auf die Endstufen ist abhängig von ihrem nominellen Widerstand und ihrer maximalen Dauerbelastbarkeit: Während die TDA7575B für die Mitteltöner (20Ω, 50W) im Zwei-Kanal-Betrieb arbeiten, arbeiten die Endstufen für die vorderen Tieftöner (1,40Ω, 90W) im Ein-Kanal-Betrieb. Surround- und Hochtönlautsprecher werden von zwei TDA8596TH im Vier-Kanal-Betrieb angetrieben. Die Verstärkung wird über den Verstärkungsfaktor definiert, welcher das Verhältnis von Ausgangs- zur Eingangsgröße von Spannung oder Strom beschreibt. Die Impedanz eines Lautsprechers bestimmt den Stromfluss der Endstufe. Da die Lautsprecher, welche mit dem Ausgang des Verstärkers verbunden sind, mit nur 1,4 bis 6 Ω einen geringen Widerstand darstellen, fließen hier zugunsten der Leistung entsprechend große Ströme. Aufgrund der sehr geringen Impedanz der Lautsprecher ist auf die ausreichende Dimensionierung der Zuleitungen und die Qualität der Steckverbindungen zu achten. Leitungs- und Übergangswiderstände sind möglichst gering zu halten. Um die Chassis innerhalb eines Audiosystems nicht zu beschädigen und den Klirrfaktor möglichst gering zu halten, ist es wichtig, dass der verwendete Verstärker in seiner Leistung den Lautsprechern angepasst ist.⁶³ Der Subwoofer-Kanal wird vom TDA8596TH gespeist (gemessen wurden am Ausgang 7,2V) und nochmals aktiv mittels einer separaten Class-D Endstufe verstärkt. Im Vergleich zu Class-AB Endstufen liegt der Vorteil digitaler Endstufen in ihrem geringen Platzbedarf und der, besonders im mittleren Leistungsbereich, niedrigen Verlustleistung. Die geringere Verlustleistung führt zu weniger Abwärme, was wiederum in kleineren Kühlkörpern resultiert. Bei der Verwendung von Schaltnetzteilen entfällt außerdem ein großer Netztransformator. In digitalen Endstufen kommt für die Analog-Digital-Wandlung der Signale die Puls-Weiten-Modulation zum Einsatz. Am Signaleingang wird eine Sägezahnspannung mit dem anliegenden Signal zeitdiskret verglichen. Die Taktrate liegt dabei deutlich höher als die höchste zu verarbeitende Signalfrequenz. Ist die Signalspannung kleiner oder gleich der Spannung des Generators, wird eine „Eins“ ausgegeben, liegt das Signal darüber eine „Null“. Am Ende einer Periode der Sägezahnspannung wird wieder eine „Eins“ ausgegeben. Somit entstehen Intervalle unterschiedlicher Länge mit dem Wert „Null“ oder „Eins“. Die Länge eines Einser-Intervalls bestimmt dabei die Amplitude des zu digitalisierenden Signals. Bei jeder „Eins“ wird die Betriebsspannung der Endstufe durchgeschaltet, bei jeder „Null“ gesperrt. Die dabei entstehende Impulsfolge bildet das Musiksignal ab.⁶⁴ Die Leistung wird lediglich durch die Leistungsfähigkeit des Netzteils begrenzt. Die Betriebsspannung sollte frei von Störungen sein und einen möglichst geringen Quellwiderstand aufweisen. Um durch Schaltnetzteile verursachte Verunreinigungen im hochfrequenten Bereich zu vermeiden, wird das Leistungssignal am

⁶¹ Vgl. STMICROELECTRONICS (2008), Seite 7

⁶² Siehe CD im Anhang, Datei „Ausgangsspannungen Burmester Verstärker pro Click.xlsx“

⁶³ Siehe dazu Abschnitt 8.4.3 „Mechanische und thermische Schutzlimiter“

⁶⁴ Vgl. MEROTH (2008), Seite 42

Endstufenausgang durch passive Bauteile Tiefpass gefiltert. Ein aktives Filter ist hier aufgrund des hohen Stroms nicht einsetzbar. Die maximale Ausgangsspannung des Subwoofer Kanals der Burmester-Endstufe steigt so auf 28,3V, was an 3,40hm (Subwoofer Chassis) 235W entspricht.

6.1.2 Lautsprechersystem

Lautsprechersysteme unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrem Wandlerprinzip und ihrem Übertragungsbereich. Neben elektrostatischen oder piezoelektrischen Wandlerprinzipien ist das elektrodynamische das meist verwendete. Im Folgenden wird auf die im Porsche Panamera eingesetzten Lautsprechersysteme eingegangen.

Das am häufigsten verwendete und auch im Panamera installierte Umwandlungsprinzip von elektrischer in akustische Energie beruht auf dem elektrodynamischen Prinzip und wird auch als Tauchspulenwandler bezeichnet. Eine aus Kunststoffgewebe (Hochtonlautsprecher (HT)), Fiberglas (Centerlautsprecher (CT)), Mitteltonlautsprecher (MT)) oder Papier (Tieftonlautsprecher (TT)) bestehende Membran ist in konkaver Form über eine Sicke und Zentrierspinne beweglich in einem Metall- oder Kunststoffkorb aufgehängt. Eine an der Membran angebrachte ringförmige Spule befindet sich im Magnetfeld eines Neodym-Permanentmagneten und induziert bei Stromdurchfluss eine Spannung, welche in einer Auslenkung der Membran resultiert. Um die Einbautiefe möglichst gering zu halten, ist die konkave Form der Membran nicht so ausgeprägt wie bei herkömmlichen HiFi-Chassis. Generell gibt die konkave Form der Membran eine höhere Steifigkeit, was zu weniger Eigenschwingungen führt. Die durch Eigenschwingungen resultierenden, nichtlinearen Verzerrungen können durch korrekte Bedämpfung der Membran vermindert werden. Dabei sind weiche Membranen von sich aus stärker gedämpft als harte, haben allerdings auch einen geringen Wirkungsgrad sowie niedrigere Impulstreue.⁶⁵ Im Porsche Panamera sind alle Chassis nahezu luftdicht in den Verkleidungselementen untergebracht. Der Subwoofer hat dabei sein eigenes, geschlossenes Gehäuse, welches sich im Ladeboden des Kofferraums befindet. In der nachfolgenden Tabelle sind alle im G1 eingesetzten Lautsprecher aufgeführt. Für die linke und rechte Seite werden dabei identische Chassis eingesetzt.

Pos.	Bez.	Ø[mm]	P[W]	Imp. [Ω]	Spule Ø[mm]	m [g]
1	CT	80	41	2	19	190
2	HT	AMT	2x25	6	-	200
3	MT	100	2x50	2	25	210
4	TT	220	2x90	1	36	1.050
5	HT	25	2x25	4	25	51
6	MT	100	2x50	2	25	210
7	TT	200	2x50	2	36	840
8	SR	80	2x41	2	19	150
9	Sub	250	300	4	50	5.450
Verstärker (digital)			1.003			1.150
			Σ Leistung = 1.003W		Σ Gewicht = 11.062g	

Tabelle 6-1: Übersicht der eingebauten Lautsprecher im Porsche Panamera (G1). Eigene Darstellung

⁶⁵ Vgl. TENBUSCH (1989), Seite 64

Nicht alle Lautsprecher im Panamera arbeiten nach dem elektrodynamischen Wandlungsprinzip. Die Hochtöner vorn arbeiten nach dem elektromagnetischen Prinzip. Die von der Firma ELAC bereitgestellten Lautsprecher arbeiten mit einer gefalteten lamellenförmigen Membran, welche mit Leiterbahnen überzogen ist. Beim Anlegen einer Spannung bauen diese ein elektrisches Feld auf, welches mit dem der Permanentmagneten, die im Montagerahmen des Lautsprechers eingebracht sind, in Wechselwirkung tritt. Dabei werden die Lamellen abhängig vom Signalfluss aufeinander zu oder voneinander weg bewegt. Die komprimierte, bewegte Luft führt zu einer Erhöhung des Strahlungswiderstandes, was in einem höheren Wirkungsgrad der Membran resultiert. Die sogenannten Air Motion Transformer (AMT) lassen somit bei kleiner Strahlerfläche eine deutlich größere Membranfläche wirksam werden, haben dadurch ein besseres Abstrahlverhalten, durch gleichmäßigen Membranantrieb weniger Partialschwingungen und durch das geringe Membrangewicht ein sehr gutes Impulsverhalten. Das Obertonspektrum wird beinahe ausschließlich von geradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz bestimmt und das Phasenverhalten ist gegenüber anderen Hochtönerkonstruktionen sehr gleichmäßig.⁶⁶ Diese von Oskar Heil entwickelte Technologie wurde aus dem HiFi-Bereich übernommen und findet sich derzeit ausschließlich in Serienfahrzeugen von Porsche.

6.2 Pro Audio Equipment

Im Folgenden wird die für die Versuche genutzte externe Audiotechnik und ihr Aufbau und die Einbindung in das Fahrzeug betrachtet. Dabei wird zwischen der verwendeten Hardware, wie Endstufen und Controller, sowie der Software unterschieden, in welcher der Audioflow des Panamera Burmester nachgebildet wird.

6.2.1 Hardware

Die gesamte Hardware wurde von der Firma Audio PRO Heilbronn geliefert und von der Firma rentronic in einem 19" Rack installiert und verkabelt. Zum Einsatz kommen hochwertige 8-Kanal Class-D Endstufen und Controller aus der professionellen PA-Installationstechnik. In dem Rack sind zwei Crown DCi 8 300 (mit 300W Ausgangsleistung pro Kanal) für den Antrieb aller Lautsprecher bis auf die Tieftönlautsprecher und dem Subwoofer untergebracht. Für Letztere kommt eine doppelt so leistungsfähige Crown DCi 8 600 (mit 600W Ausgangsleistung pro Kanal) zum Einsatz. Die Endstufen sind bewusst überdimensioniert gewählt, damit einerseits der sichere Betrieb an den 1,4 Ohm Tieftönern gewährleistet werden kann und andererseits die Endstufen stets in einem verzerrungsarmen Bereich arbeiten. Die hohe Leistung ist Voraussetzung, um festzustellen zu können, ob das begrenzende Element im Fahrzeug die Lautsprecher, oder aber die Endstufen des Burmester Systems sind.

Als digitaler Lautsprecher-Controller kommt ein BSS-BLU100 zum Einsatz. Da dieser nicht genügend (acht) Ausgänge bereitstellt, muss er um zwei „Breakout Boxen“ BLU-BOB-01 mit je acht weiteren Ausgängen erweitert werden. Diese kommunizieren verlustfrei mit bis zu 96kHz digital über den BLU-Link

⁶⁶ Vgl. GOERTZ (2008), Seite 426ff

Audio Bus via Ethernet. Insgesamt stehen so 12 symmetrische Eingänge und 24 symmetrische Ausgänge zur Verfügung. Die BSS-Controller der Firma Harman sind BSS-Soundweb-fähig und lassen sich so in einem großen Systemverbund zentral über Ethernet verwalten und steuern. Über einen W-LAN Router der Firma Netgear ist eine drahtlose Kommunikation mit dem Controller möglich. Eingangsseitig ist ein CD-Player der Firma Burmester (symmetrisch XLR), sowie ein Audio-Interface der Firma RME (Fireface-uc, symmetrisch Klinke) angeschlossen. Ein weiterer Stereoeingang, welcher am Rack im RCA-Format endet, lässt das Anschließen weiterer Zuspielder zu. Über ein im Netzwerk eingebundenes iPad ist es möglich, im Vorfeld definierte Parameter des BSS-BLU 100 zu ändern oder verlustfrei Musik mittels der Software „Airplay EX“ über den Laptop auf das Soundsystem zu übertragen.

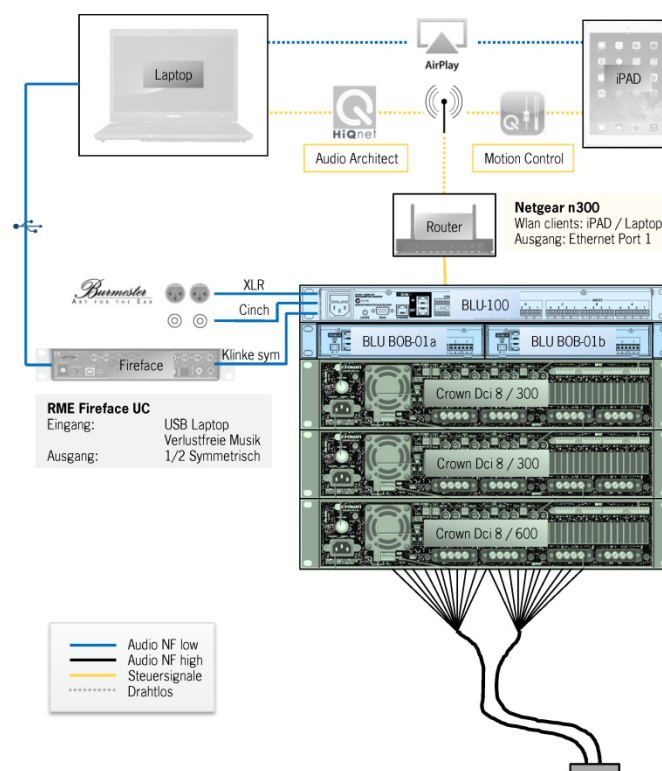


Abb. 6-1: Übersicht der Verkabelung der externen Geräte. Eigene Darstellung⁶⁷

Für die Einbindung der externen Audiotechnik in das Fahrzeug mussten Kabel konfektioniert und neue im Panamera verlegt werden. Voraussetzung war, dass ein schneller und einfacher Wechsel von dem im Fahrzeug versuchsweise installierten 3D-Setup gesichert ist. Die Zuleitungen zu den Lautsprechern sind direkt hinter dem Burmester-Verstärker aufgetrennt. Um einen Wechsel zwischen dem 3D-Setup und dem PA-Setup ohne umständliches Öffnen der Fußraumabdeckung zu ermöglichen, liegt die Trennstelle der 32Pol-Kabel im Fußraum. Über einen Tyco32-Pol Steckverbinder ist das PA-Rack eingebunden. Das Multicore (2m lang) endet in einem Spleis auf Speakon NL4 Steckern, welche über ein Patchfeld zu den

⁶⁷ Eine detaillierte Übersicht des Aufbaus findet sich auf der CD im Anhang „PA-Rack – Signalfuss.pdf“

Endstufen führen. Parallel läuft eine weitere 2-Pol Leitung, welche nicht auf dem Tyco32-Pol liegt, zum Subwoofer (4mm², verdreht). Die Kabelquerschnitte in dem durch die EIZ-Werkstatt neu angefertigten Kabel entsprechen denen im Fahrzeug. Ohne Rücksichtnahme auf die Übergangswiderstände steigt durch die Verlängerung der Leitungswiderstand um vernachlässigbare 0,009 Ohm (4mm²) bis 0,046 Ohm (0,75mm²).⁶⁸ Der Pin- und Kanalbelegungsplan sowie die verwendeten Querschnitte finden sich in einer Übersicht auf der CD im Anhang („PA Rack - Verkabelung und Einbindung.pdf“).

6.2.2 Endstufen

Die Crown-Endstufen haben bei 1V (bzw. 1,4V DCi 600) Eingangsempfindlichkeit einen festen Voltage Gain (Verstärkungsfaktor) von 34dB. Nur durch einen Input-Attenuator (eingangsseitige Dämpfung) kann das Ausgangssignal verringert werden. Bei einer ersten Inbetriebnahme der Endstufen am Fahrzeug wurde ein merkliches Rauschen auf den Lautsprechern festgestellt. Um dieses zu verringern, müssen die gerasterten Input Attenuator Potentiometer auf allen Kanälen auf denselben Wert eingestellt werden. Bei 34dB Voltage Gain liegen ohne Bedämpfung bei 1V Eingangsspannung 50V am Ausgang an. Bei der Reduzierung der Verstärkungsleistung gilt es zu beachten, wieviel maximale Ausgangsspannung (=maximale Peak-Belastbarkeit der Lautsprecher⁶⁹) nötig ist. Für die Angleichung aller Kanäle nutzt man ein 100Hz Sinussignal, das durch einen Frequenzgenerator bei einer Spannung von 0dBu (0,775V) erzeugt wird und legt dies an den jeweiligen Eingang des Kanals, um von diesem die Ausgangsspannung mit einem Spannungsmessgerät zu bestimmen. Da die Rasterung der Potentiometer nicht exakt arbeitet, muss jeder Kanal einzeln vermessen werden. So konnten nahezu identische Ausgangsspannungen auf allen Kanälen erreicht werden. Die Abweichungen bewegen sich dabei in einem Bereich von max. 1,5%, bzw. ±0,1dB und damit unterhalb der Wahrnehmungsschwelle.

	Eingang	Ausgang	Spannungsverstärkung
Datenblatt (ohne Dämpfung)	1V	50V	34dB
Potentiometer der Eingangsbedämpfung auf 12 Uhr (Rauschen im Fahrzeug akzeptabel)			
Messung (BSS Ausgang 0dBu)	0,775V	7V	Entspricht 19dB
Messung (BSS Ausgang 12dBu)	3,3V	28,2V	Entspricht 19dB

Tabelle 6-2: Ein- und Ausgangsspannung abhängig vom Voltage Gain. Eigene Darstellung

Die Spannungsverstärkung wurde auf 19dBu reduziert, was das Rauschen auf ein akzeptables Maß brachte. Anschließend wurde untersucht, wie stabil die Ausgangsspannung unter verschiedenen Lasten bleibt. Dabei wurde festgestellt, dass unabhängig von der angeschlossenen Impedanz die Ausgangsspannung auf allen Kanälen gleich bleibt. Dies trifft auch bei Erhöhung der Eingangsspannung weiterhin zu. Eine Übersicht zum Pegelflow der externen Audiotechnik findet sich auf der CD im Anhang unter der Datei „Pegelflow BSS-System.pdf“.

⁶⁸ Bei einem spezifischen Widerstand ρ von 0,0172 (Kupfer)

⁶⁹ Siehe dazu Abschnitt 7.4.3 „Mechanische und thermische Schutzlimiter“

6.2.3 Software

Der BSS-BLU-100 ist ein digitaler System-Controller, welcher als Vorstufe zum aktiven Ansteuern von Mehrwegelautsprecher-Systemen konzipiert ist. Solche Controller werden vor allem in der Live-Beschallungs- und Installationstechnik eingesetzt. Neben Frequenzweichenfunktionen beherrscht der BSS-BLU-100 Signalverzerrung mittels vollparametrischen Equalizern, Delay, Phase-Shift und Kompressor- sowie Limiterfunktionen. Auch bietet er umfangreiche Matrixfunktionen zum Routen der Audiosignale an. Sämtliche Pegel und Signalflüsse lassen sich über Monitoring-Funktionen überwachen. Über Ethernet empfängt er Steuer-, sowie Datensätze von der Software „London Architect“ oder „Audio Architect“. Mit der erst im April 2014 präsentierten Software „Audio Architect“, ist eine komfortablere und umfangreichere Bedienung zur vorherigen Software „London Architect“ möglich. Sie entstammt der Verschmelzung der Software „System Architect“ und „London Architect“ und vereint deren Funktionen der Überwachung, Einrichtung, sowie Systemkontrolle aller sich in einem Netzwerkverbund befindenden HiQnet-Geräte. Außerdem ist es durch die HiQnet iOS Applikation „Motion Control“ über ein iOS Gerät möglich, verschiedene Parameter in einzeln angelegten Kontrolloberflächen zu überwachen und unmittelbar zu ändern. Diese sogenannten „Custom Panels“ können weitestgehend flexibel gestaltet und eingerichtet werden. Da sich die Software noch im Entwicklungsprozess befindet, stehen trotz zahlreicher Updates während der Bearbeitungszeit dieser Arbeit noch nicht alle gewünschten Funktionen zur Verfügung. Das von Achim Huber (Vertrieb Audio-PRO Heilbronn) erklärte Bestreben des Herstellers, erst alle HiQnet fähigen Geräte in die Software „Audio Architect“ zu implementieren und sich dann den „Feinheiten“ zu widmen, führt dazu, dass die Einsatzmöglichkeiten der Motion Control Software für diese Arbeit recht beschränkt und rudimentär waren. Bis zuletzt war es nicht möglich, angelegte Presets vom iPad aus abzurufen. Das führte besonders zu Beginn der Arbeit dazu, dass das iPad als reiner Zuspeler fungierte und sämtliche Einstellungen und Kontrollfunktionen im Fahrzeug per Laptop vorgenommen wurden. Eine weitere Möglichkeit der Fernsteuerung des Laptops und damit der Software entsteht über die Nutzung der Software „iTeleport“. So lässt sich der Bildschirminhalt des Computers auf das iPad spiegeln und bedienen. Die Einrichtung des BSS-BLU-100 wird im folgenden Kapitel beschrieben.

7 Adaptieren der Klangabstimmung des G1-Soundsystems

Damit ein Vergleich und die Bewertung der untersuchten Parameter und Delaystrukturen möglich ist und auch nach Abschluss der Arbeit weitere Gelegenheiten für Klanguntersuchungen auf Basis des G1 bestehen, ist es notwendig, die Klangabstimmungen des G1 Soundsystems auf den BSS-Controller zu übertragen. Ein Thema, welches zu Beginn der Arbeit und in der Zeitplanung nur wenig Beachtung fand, da eine einfache und schnelle Umsetzung vermutet wurde. In den ersten Wochen der Bearbeitungszeit wurde klar, dass die Thematik allerdings mit deutlich mehr Aufwand verbunden ist. Es stellte sich heraus, dass nach dem Erstellen eines identischen Signalfusses das simple Übertragen der im G1 eingesetzten Parameter nicht zu dem angestrebten klanglichen Ergebnis des Burmester-Systems führt. Um den Klang des Soundsystems unter Verwendung der PA-Technik dem des Burmesters möglichst nahe zu bringen, müssen folglich genauere Untersuchungen und Messungen vorgenommen werden.

7.1 Erstellung des Automotive Signalfusses auf Audio Architect

Zu Beginn wird der Signalfuss des Burmester-Verstärkers betrachtet und in der Controller-Software „Audio Architect“ nachempfunden. Wie schon in Kapitel 5.1.1 erwähnt, wird das Audio Processing im Burmester-Verstärker von zwei verschiedenen DSP übernommen. Die Aufteilung ihrer Arbeitsbereiche wird in Abbildung 7-1 durch die unterschiedliche, farbliche Kennzeichnung deutlich. Auch lassen sich die Eingriffspunkte des Soundconditioners, der Volume und andere Steuersignale, welche vom PCM ausgehen, erkennen.

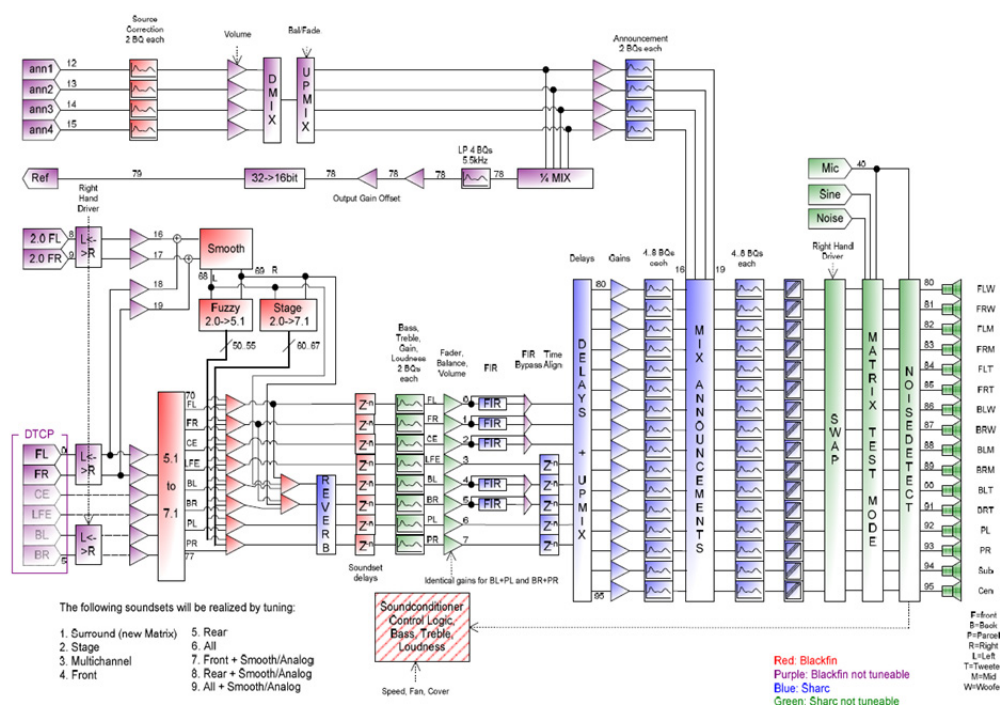


Abb. 7-1: Audioflow G1-Burmester-System, Quelle: Porsche_G1_Pflichtenheft_2.00

Abhängig vom Eingangssignal findet ein Upmixing auf 16 Ausgangskanäle statt. Für die Untersuchungen dieser Arbeit werden ausschließlich Stereo-Signale genutzt, weshalb für die Portierung nur der Signalfluss des Stereo-Zweiges von Interesse ist. Die für die Klangadaption relevanten Module Upmix (Matrix, Frequenzweiche), Phaseshift, Delay, Equalizer, Gain, Kompressor und Limiter werden in den Audioflow des BSS-BLU-100 übernommen.

Nach einer kurzen Einführung in die Software „Audio Architect“ durch Achim Huber und dem Einrichten sowie Verkabeln der Hardware, wurde der Aufbau des Signalflusses geplant und umgesetzt. In der als Modul angelegten Matrix wird das Stereo-Signal auf die einzelnen Kanäle aufgeteilt. Nach Angaben des vom Soundsystem zuständigen Zulieferers sind sämtliche Signale diskret links und rechts geroutet. Center- und Subwooferkanal werden mit jeweils -3dB Gain als Summe vom linken und rechten Kanal gespeist. Um bei einer Addition der Kanäle einen linearen Frequenzgang zu erhalten, muss die Dämpfung bei kohärenten -6dB und bei inkohärenten Signalen -3dB betragen. Eine Dämpfung von -3dB setzt in den Stereokanälen eine mittlere Phasenverschiebung von 45° voraus, was bei z.B. in der Mitte der Mischung platzierten Basssignalen oft nicht der Fall ist. Mittenschallquellen werden so gegenüber Seitenschallquellen um 3dB hervorgehoben. Bei dem Einsatz eines Frequenzunabhängigen 90° Filters vor der Summierung würde dieses Problem verringert werden.⁷⁰

Nach der Aufteilung der Signale durch die Routing-Matrix gelangen diese in einzelne Stränge, wo sie individuell prozessiert werden. Im „Audio Architect“ werden die Module in der Reihenfolge wie in Abbildung 7-2 nachzuvollziehen angelegt.

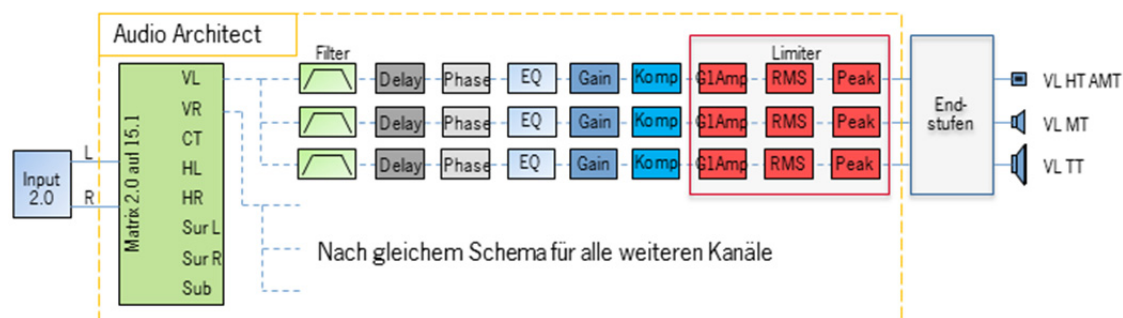


Abb. 7-2: Audioflow Audio Architect / BSS-BLU-100. Eigene Darstellung

Die durch den Zulieferer genannten Parameter des G1 Burmester-Verstärkers wurden 1:1 übertragen.⁷¹ Es wurden Werte für die Frequenzweiche, Equalizer, Gain und Kompressor übertragen.

Nach einem ersten Hörversuch wurde deutlich, dass eine 1:1-Übertragung der Parameter die klanglichen Eigenschaften des G1-Burmester-Soundsystems nicht vollständig auf das BSS-System transportieren konnte. Am auffälligsten sind dabei der geringe Pegel im Bassbereich sowie ein

⁷⁰ Vgl. DICKREITER (1987), Seite 380

⁷¹ Eine Tabelle mit den Werten findet sich im Anhang auf CD in der Datei „G1 Parameter.pdf“.

mittenbetontes Klangbild, welches sich auch durch einfaches Anheben des Gains der Tieftonlautsprecher nicht einstellte. Um festzustellen, wo die Diskrepanzen in der Abstimmung lagen, wurden unter Verwendung der Software TrueRTA akustische und elektrische Einzelmessungen eines jeden Lautsprechers durchgeführt. Generell werden die Mess- und Hörversuche unter neutralen Einstellungen des PCM durchgeführt. Das heißt im Einzelnen, dass die Volume bei 20 von 40 Clicks steht, sich Bass- und Treble-Slider in neutraler Stellung, Fader und Balance auf Mittelposition befinden und klangbeeinflussende Presets und der Soundconditioner inaktiv sind. Auch die Loudnessfunktion des Verstärkers, welche unterhalb von 20 Clicks aktiv ist, wird so umgangen.

7.2 Korrekturen der Übertragungsfunktion

Durch akustische Messungen mit der Software „TrueRTA“ werden die Unterschiede im Frequenzgang sichtbar. Die Messungen wurden mit einem Messmikrofon der Firma Microtech Gefell, welches an einem RME Fireface-uc angeschlossen war, durchgeführt. Als Messsignal diente ein unkorreliertes, rosa Rauschen, das von einer CD abgespielt wird. Bei Messungen des Burmester-Soundsystems war diese im PCM bei 20 Clicks Lautstärke eingelegt, bei Messungen des BSS-Systems im Laufwerk des Laptops. Zunächst wurde mittels eines weiteren Analyzers (NTi XL2) der dB SPL-Pegel bei 20 Clicks an der Messposition am Fahrersitz bestimmt. Um Wiederholungsmessungen mit exakt gleicher Messposition durchführen zu können, wurde die Messposition nach DIN ISO 5128⁷² festgelegt. Hier ist das Mikrofon in 70cm Höhe zentriert über dem Fahrersitz positioniert. Der Abstand zur Hutze des Kombiinstrumentes beträgt 68 cm. Die Vorverstärkung des Fireface wurde auf einen Wert gestellt, der sicherstellt, dass das Messmikro in der Software „TrueRTA“ den gleichen dB SPL-Wert aufweist wie der des NTi. Somit war gewährleistet, dass die gemessenen dB SPL auch den tatsächlichen Schalldrücken entsprechen. Exemplarisch wird in Abbildung 7-3 der Frequenzgang des Mitteltöners vorne rechts betrachtet.



Abb. 7-3: Frequenzgang Mitteltön vorne rechts. Eigene Darstellung

⁷² DIN ISO 5128:1984-11 (D) Akustik; Innengeräuschemessungen in Kraftfahrzeugen

Die gelbe Linie zeigt den Frequenzgang des Mitteltöners bei Ansteuerung durch den Burmester-Verstärker, die magentafarbene Linie den Frequenzgang bei Verwendung der durch den Zulieferer genannten Parametern im BSS-Controller und die orangefarbene Linie den durch Verändern von Parametern im BSS-Controller erreichten Frequenzgang. Auffällig ist, dass im Bereich der Trennfrequenzen eindeutige Abweichungen im Frequenzgang vorliegen. Diese treten insbesondere in allen Kanälen, in denen ein analoges Filter (CT, MT und HT) vorliegt auf. Korrigiert man den Filter von vierter auf zweite Ordnung, gelingt -am Beispiel des Mitteltöners- eine weitestgehende Übereinstimmung des Frequenzganges (Abbildung 7-3). Die erste Vermutung, dass die analogen Filter durch unkorrektes Design in ihren Flankensteilheiten nicht ordnungsgemäß arbeiten, konnte durch eine elektrische Messung widerlegt werden. Das Frequenzweichen-Design weist folgende, in Tabelle 7-1 beschriebene, Übergänge auf:

LS	Charakteristik	fg Low	Ordnung	fg High	Ordnung
HT	BW	3500	4. 24dB/Okt.	-	4. 24dB/Okt.
MT	BW	350	4. 24dB/Okt.	3500	4. 24dB/Okt.
TT vorn	BW	50	2. 12dB/Okt.	140	2. 12dB/Okt.
TT hinten	BW	60	2. 12dB/Okt.	220	2. 12dB/Okt.
CT	BW	350	4. 24dB/Okt.	-	4. 24dB/Okt.
Sub	BW	25	4. 24dB/Okt.	60	4. 24dB/Okt.
Sur	BW	250	4. 24dB/Okt.	-	4. 24dB/Okt.

Tabelle 7-1: Frequenzweichen-Design Burmester-Verstärker. Eigene Darstellung

Auffällig sind unter theoretischen Aspekten die Übergänge zwischen den Tief- und Mitteltonlautsprechern. Durch den Phasenversatz von 90° zu 180° kommt es im Übergangsbereich zu Auslöschungen.⁷³ Durch ein Invertieren der Polarität der Mitteltonkanäle, konnte der Summenfrequenzgang der Klangadaptierung im BSS-System weitestgehend in Übereinstimmung mit dem des Burmester-Verstärkers gebracht werden.

7.3 Ermittlung der statischen und dynamischen Kompressor-Parameter

In Tabelle 7-2 sind die vom zuständigen Soundsystem-Zulieferer genannten Kompressor-Parameter dargestellt. Laut diesem kommt auf allen Kanälen der gleiche Kompressor mit identischen Parametern zum Einsatz.

G1 Kompressor	
Threshold	-36
Ratio	03:01
Attack	10ms
Release	100ms
Rotation Point	-6

Tabelle 7-2: Kompressor-Parameter Panamera G1. Eigene Darstellung

⁷³ Siehe Abschnitt 9.2.2 „Bestimmung der Delayzeiten“

Der niedrige Schwellwert bei einem Ratio von 3:1 sowie die festen Regelzeiten in allen Frequenzbereichen decken sich nicht mit dem subjektiven Klangempfinden des Systems durch den Autor. Um Zweifel und Unklarheiten bezüglich der Parameter zu beseitigen, entstand die Aufgabenstellung, das dynamische und statische Verhalten des Kompressors und der Limiter in der jetzigen Fahrzeuggeneration des Panamera genauer zu untersuchen. Hierfür wurden mehrere unterschiedliche Messungen am Fahrzeug durchgeführt. Ziel der Untersuchung ist es, negative klangliche Beeinträchtigungen durch falsche Parametrisierung des Kompressors und der Limiter auszuschließen und Rückschlüsse für eine mögliche Optimierung der Parameter ziehen zu können.

7.3.1 Messaufbau

Die Messung der Kompressor- und Limiter-Parameter wurde rein elektrisch durchgeführt. Im PCM des G1 war eine Testsignal-CD eingelegt. Das PCM wurde auf 30 Clicks eingestellt, welche sich im Service Menu des PCM, unter dem Punkt „Audio/TLAM/idle“ anzeigen lassen. Über einen Trennadapter wurde das prozessierte und verstärkte Ausgangssignal der Automotive-Endstufe abgegriffen. Um das Fireface-uc vor zu hohen Strömen zu schützen, wurde ein Dämpfungsglied zwischen das Interface und die Endstufe installiert. Um nicht auf einer der Dual-Bridge Endstufen einen Kurzschluss zu verursachen, wurde die Schaltung symmetrisch aufgebaut. Die Messungen wurden mit angeschlossener Last durchgeführt. Dazu wurde parallel zum Endstufenausgang am Trennadapter ein Lautsprecher mit regelbarer Dämpfung und einem Nennwiderstand von 1,8 Ohm angeschlossen. Zuspielder- und Recording-Programm war die DAW-Software „Pro Tools 10“.



Abb. 7-4: Messsignal dynamisches Verhalten Kompressor/Limiter
 Oben: Eingangssignal, 1000Hz Sinus, 10dB Stufen
 Unten: Ausgangssignal, dynamisches Verhalten der Regelverstärker wird sichtbar. Eigene Darstellung

Als Testsignale dienten Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz mit verschiedenen Pegeln.⁷⁴ Je nach gemessenem Frequenzbereich liegen diese bei 40Hz für den Subwoofer, 100Hz für die Tieftöner, 1000Hz für die Mitteltöner Center und Surrounds und 10000Hz für die Hochtöner. Wie in Abbildung 7-4 zu sehen, wird das Signal alle zwei Sekunden in 10dB Schritten von 0dB bis -60dB abgeschwächt bzw. erhöht. Um Verzerrungen zu vermeiden, muss bei der Generierung der Signale darauf geachtet werden,

⁷⁴ Die Messsignale finden sich im Anhang auf der CD in dem Ordner „Messsignale“.

dass die Pegelerhöhungen/Absenkungen genau im Nulldurchgang der Sinusschwingung stattfinden. Es wurden Messungen in den Kanälen TT, MT, HT vorne, CT, TT, MT, HT hinten, Surround sowie Subwoofer durchgeführt. Durch die symmetrische Abstimmung ist eine Unterscheidung von linker und rechter Seite unnötig. Für die Ermittlung des Threshold wurde alle zwei Sekunden ein Sinussignal über das PCM sukzessive am Volume-Dreh- /Drücksteller in seinem Pegel um einen Click erhöht. Die Volume-Kurve an der Head Unit (HU) wird linear in MOST-Werte übersetzt, jeder MOST-Wert entspricht einem 0,35dB Schritt (0-255). Dabei variiert das Übersetzungsverhältnis je nach Click-Wert von 3:1 im Bereich bis 20 Clicks, über 2:1 bis 30 Clicks und 1:1 von 30 bis 40 Clicks. Dieses Verhalten stellt der von Porsche implementierte, sogenannte „Volume-Taper“ dar.

7.3.2 Messdurchführung und Ergebnisse

Im Folgenden wird das Verhalten des Kompressors exemplarisch am Mitteltonkanal vorne links erläutert. Durch die Betrachtung der Aufnahmen des Ausgangs der Automotive Endstufe wird das dynamische und statische Verhalten des Kompressors und Limiters sichtbar.

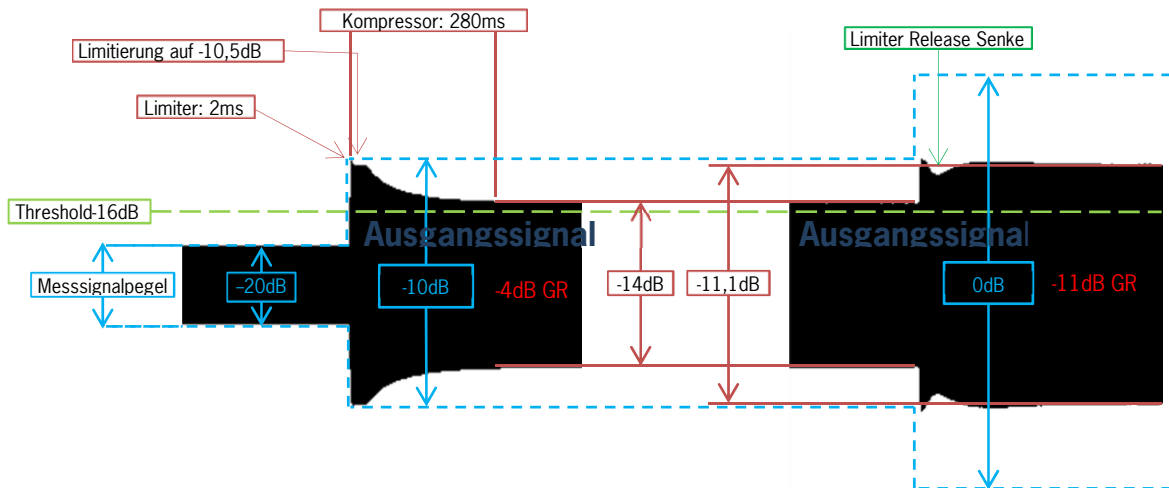


Abb. 7-5: Dynamisches Verhalten des Kompressors im Mittelton – Attackphase. Eigene Darstellung

Abbildung 7-5 zeigt, in blau gestrichelt, den ursprünglichen Eingangspegel des Messsignals. Die schwarze Fläche stellt das Ausgangssignal über die Zeit dar. Mit „Pro Tools“ lassen sich über die Markierungsfunktion samplegenau Zeiten erfassen. Da sich das Ende eines Einregelvorgangs visuell nicht exakt bestimmen lässt, wurde die Länge näherungsweise abgeschätzt. Die erfassten Regelzeiten beziehen sich auf die Dauer einer vollständigen Kompression (100%). So wurde im Mitteltonkanal vorne links, in Abhängigkeit der Gain-Reduction, ein Attack von im Schnitt etwa 280ms festgestellt. Durchschnittlich wurde so in allen Kanälen, bis auf den Hochtonkanälen, ein Attack von 300ms ermittelt. Aus den Pegeln wird ersichtlich, dass der Kompressor bei -10dB Input mit einer Ratio von 3:1 das Signal auf -14dB reduziert. Das entspricht einer Gain-Reduction von 4dB. Bei 0dB Input wird das Signal auf -11,1dB reduziert, was bei -16dB Threshold ebenfalls einer Ratio von 3:1 entspricht.

Das Ratio ist der Quotient aus der Differenz des Threshold zu Eingangs- und Ausgangspegel.

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Threshold} - \text{Eingang}}{\text{Threshold} - \text{Ausgang}}$$

An dieser Stelle wurde das Ratio zwecks der Übersichtlichkeit aus den aufgenommenen relativen Pegeln berechnet; für die tatsächliche Berechnung wurden allerdings die absoluten Pegel, welche in den statischen Messungen ermittelt wurden, verwendet. Aufgrund des geringen Regelbereichs des Kompressors (Threshold kurz vor dem des Limiters) und des dahinter geschalteten Limiters, war die Berechnung nicht in allen Kanälen einwandfrei möglich. Mit geringen Abweichungen konnte in allen Kanälen eine Ratio von 3:1 festgestellt werden, was der Angabe des Zulieferers entspricht.

In Abbildung 7-6 ist die Releasephase des Kompressors zu sehen. Für die Betrachtung der Ausregelzeiten wurde das Messsignal, beginnend mit 0dB in abfallender Richtung, aufgenommen. Nach jedem Pegelsprung von 10dB wird durch die danach entstehende Senke die Releasezeit abschätzbar. Dabei wurde deutlich, dass analog zur Attackphase, je nach Höhe der Gain-Reduction, das Release unterschiedlich lang ausfällt. Bei 10dB Gain-Reduction liegt beispielsweise das Release bei 380ms, während es bei 4dB Gain-Reduction nur noch 170ms beträgt.

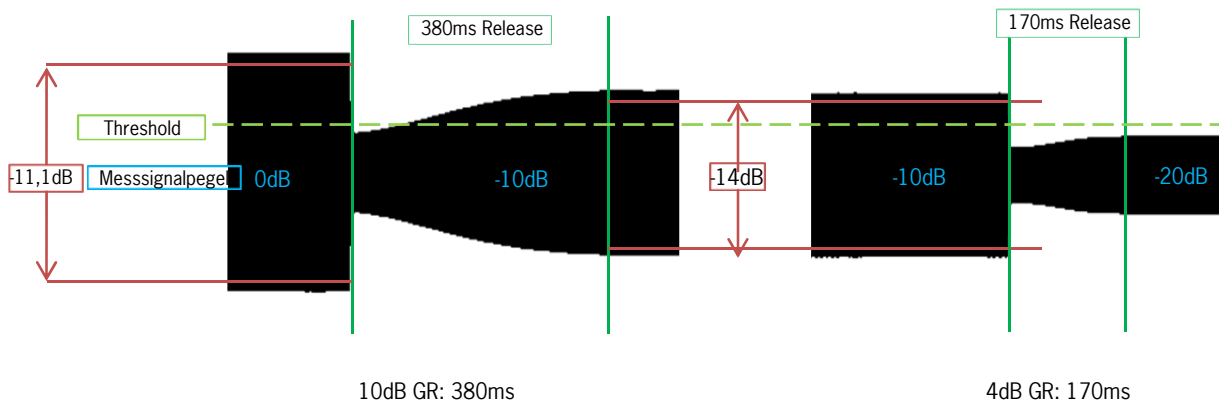


Abb. 7-6: Dynamisches Verhalten des Kompressors im Mittelton – Release. Eigene Darstellung

Dieses lineare Verhalten ist in der Konstruktion von Kompressoren leichter umzusetzen, führt bei hohen Gain-Reduzierungen jedoch zu langen Ausregelzeiten. Der Kompressor des BSS-BLU100 arbeitet in seinen Zeiten unabhängig von der Gain-Reduction. Das heißt, egal wie hoch diese ausfällt, wird konsequent dieselbe Releasezeit eingehalten. Somit lässt sich das Verhalten des im G1 implementierten Kompressors nicht im BSS-Controller nachbilden. Welche Nachteile dieses Verhalten aufweist, wird in Kapitel 8.2 behandelt.

Die Bestimmung des Threshold der Kanäle wurde über den im Abschnitt 7.3.1 erläuterten zweiten Messaufbau durchgeführt. Über die Gain-Analyse-Funktion in „Pro Tools“ kann in Aufnahmen festgestellt werden, ab wieviel Clicks es zu einer Abweichung in der Pegelzunahme kommt. Da die aufgenommenen Pegel ohne festen Bezug nur der relativen Betrachtung dienen, musste der abgezählte Click-Wert mittels der Tabelle „Volume-Taper-Clicks“⁷⁵ in absolute dBFS-Werte übersetzt werden. Dabei wurden folgende in Tabelle 7-3 eingetragenen Werte festgestellt.

LS	Kompressor bei 0dB input ab	Entspricht dBFS
HT vorn	Nur Limiter erkennbar	-
MT vorn	23 Clicks	-22dBFS
TT vorn	25 Clicks	-18dBFS
CT vorn	Nur Limiter erkennbar	-
HT hinten	26 Clicks	-16dBFS
MT hinten	25 Clicks	-18dBFS
TT hinten	28 Clicks	-13dBFS
SUR	27 Clicks	-14dBFS
SUB	25 Clicks	-18dBFS

Tabelle 7-3: Kompressor Threshold – Absolut Werte. Eigene Darstellung

Die unterschiedlichen Threshold Werte decken sich weitestgehend mit den Gain-Abweichungen der einzelnen Kanäle. Nimmt man den MT vorn als Bezugspunkt (hier liegt der Gain bei 0, die Frequenz des Testsignals ist so gewählt, dass kein Einfluss durch einen EQ vorliegt), lässt sich die Gainstruktur des Soundsystems erkennen. Abweichungen sind auf die gerundete Übersetzung der Volume-Kurve zurückzuführen. In allen Kanälen lässt sich ein Threshold von -18dBFS feststellen. Die Übertragung der Werte in den BSS-Controller gelingt nur durch den Bezug zu den ermittelten Thresholds der Endstufen-Emulations-Limiter.⁷⁶ Diese weisen neben dem absoluten Pegel eine messbare Ausgangsspannung auf. So lassen sich den dBFS-Werten Spannungswerte zuordnen, woraus die Threshold Parameter in dBu abgeleitet werden können. Alle ermittelten Werte wurden in die BSS-BLU100 Kompressoren eingetragen, dort erneut Testweise aufgenommen und mit den Messungen des G1 erfolgreich verglichen.

⁷⁵ Die Tabelle findet sich im Anhang auf CD unter der Datei „Ausgangsspannung Burmester Verstärker pro Click.xlsx“

⁷⁶ Siehe Abschnitt 7.4 „Ermittlung der statischen und dynamischen Limiter-Parameter“

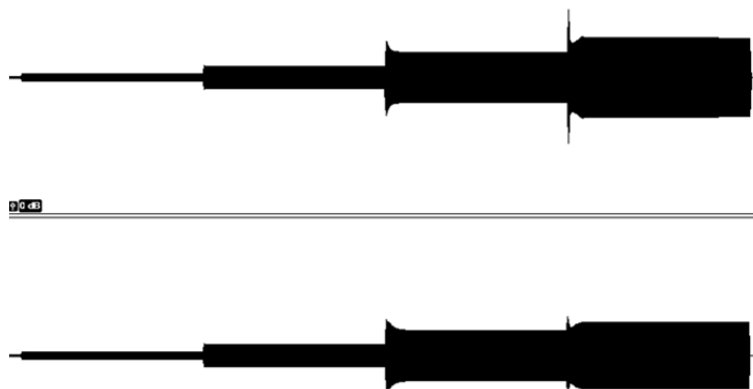


Abb. 7-7: Vergleich der Abbildung der Dynamikprozessoren im BSS (oben)
Automotive Singalflow (unten). Eigene Darstellung

In Abbildung 7-7 wird die Problematik, dass die Limiter im BSS-System durch ihre Algorithmik trotz kürzest möglicher eingestellter Regelzeit „Durchschüsse“ zulassen, erkennbar. Ferner fallen durch eine maximal wählbare Attack-Zeit von 200ms die Einregelvorgänge des Kompressors etwas kürzer aus.

7.4 Ermittlung der statischen und dynamischen Limiter-Parameter

Neben der durch Messungen ermittelten Limiter-Parameter aus dem Burmester-Verstärker werden in der Signalkette im BSS-BLU-100 in jedem Kanal noch zwei weitere Limiter implementiert. Ein Limiter dient dem thermischen und einer dem mechanischen Schutz der Lautsprecher. Zuerst wird auf die Limiter-Parameter des Burmester-Verstärkers eingegangen. Dieser soll in der PA-Rack-Wiedergabe als Emulations-Limiter die maximale Lautstärke und somit die Begrenzung des Burmester-Systems abbilden.

7.4.1 Messaufbau

Die aufgezeichneten Messungen der Kompressoren dienen auch der Ermittlung der dynamischen Parameter der Limiter. Für das statische Verhalten der Limiter wurden weitere Messungen durchgeführt. Eine CD mit verschiedenen Testsignalen⁷⁷ wurde im PCM eingelegt. Je nach Kanal wurden Sinusfrequenzen gewählt, welche nicht durch Frequenzweiche oder Equalizer beeinflusst werden. Über einen Trennadapter wurde der jeweilige Kanal unter Last an einem digitalen Oszilloskop⁷⁸ betrachtet. Dabei wurde der Verlauf der Amplitude der Sinusspannung beobachtet und dokumentiert. Der Volume-Dreh-/Drücksteller am PCM wurde bei jedem Messintervall um einen Click erhöht. Ein Click entspricht je nach Bereich der Volume-Skala ein bis drei dB. In dem für den Einsatz der Limiter relevanten Bereich beträgt das Übersetzungsverhältnis zwischen 20 und 30 Clicks in etwa 2:1 und ab 30 Clicks 1:1.⁷⁹ Als

⁷⁷ autohifi - Power Sound, Vereinigte Motor-Verlage / Phono Music, 1996

⁷⁸ Fluke Oszilloscope-Scopemeter 190

⁷⁹ Eine Tabelle mit dem Übersetzungsverhältnis ist auf der CD im Anhang in der Datei „Ausgangsspannungen Burmester-Verstärker pro Click.xlsx“ zu finden.

Messsignal diene ebenfalls ein Sinussignal mit einem Scheitelfaktor (Crest-Faktor)⁸⁰ von 1,41 (3dB), welches je nach Lautsprecherkanal in seiner Frequenz variierte. Eine andere Messmethodik würde zu einem noch genaueren Ergebnis führen, denn aufgrund der 2:1 Übersetzung des Volume-Tapers wird der Threshold des Limiters, sofern er unter 30 Clicks liegt, nur um 2dB genau erfasst. Exakter wäre es, Sinus-Messsignale zu verwenden, welche beginnend bei -30dB in 1dB Schritten auf bis zu 0dB in ihrer Amplitude ansteigen. Der Dreh- /Drücksteller wäre dabei konstant auf 40 Clicks eingestellt. So ist es möglich, die Limiter Schwellwerte auch unterhalb von 30 Clicks mit einer Abweichung von maximal 1dB zu ermitteln. Diese Vorgehensweise hat jedoch aus zeitlichen Aspekten heraus keine Anwendung gefunden.

7.4.2 Messdurchführung und Ergebnisse

Aufgrund der dem Limiter vorgeschalteten Kompressoren ist es nicht möglich, die Releasezeiten der Limiter aus den Aufzeichnungen abzulesen. Jedoch lassen sich die Releasezeiten näherungsweise über die „Limiter-Release-Senke“, in Abbildung 7-5 grün markiert, feststellen. Unmittelbar nach dem Pegelsprung auf 0dB entsteht eine Reduktion, welche in Form einer Senke sichtbar wird. Zunächst ist der Grund für die Existenz dieser nicht offensichtlich gewesen. Um herauszufinden, wie es zu der Senke kommt, sind Vergleichsmessungen mit dem BSS-Controller durchgeführt worden.

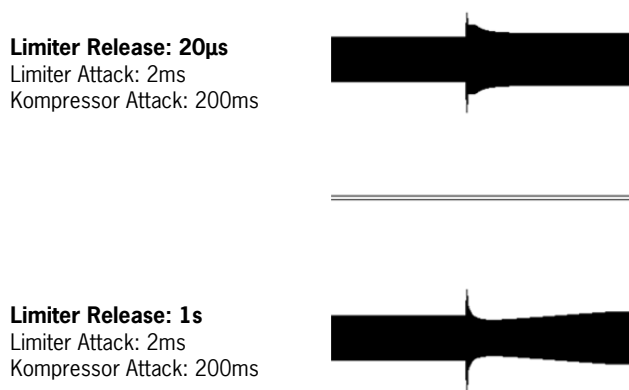


Abb. 7-8: Nachbildung der Limiter-Senke (Release) am BSS-Controller. Eigene Darstellung

Durch Eingabe der in Abbildung 7-8 genannten Parameter wird der Grund für die Entstehung der Senke in der Aufnahme des Ausgangssignals deutlich. Sie entsteht nicht, wenn Limiter oder Kompressor allein arbeiten, das heißt, der Threshold beider muss überschritten sein. Der Ablauf gestaltet sich dabei wie folgt: Liegt ein Signal an, welches sowohl den Threshold des Kompressors als auch den des Limiters überschreitet, beginnen beide in der vorgegebenen Einregelzeit mit der Pegel-Reduzierung. Je nach Attack des dem Limiter vorgeschalteten Kompressors bringt dieser das Signal nach einer gewissen Zeit unterhalb den Threshold des Limiters. Ist die Releasezeit des Limiters entsprechend lang gewählt,

⁸⁰ Der Crest Faktor beschreibt das Verhältnis vom Maximal- zum Effektivwert eines Summensignals

entsteht nun aufgrund der Gain-Reduzierung des Kompressors ein Hüllkurvenverlauf, welcher unterhalb des Thresholds des Limiters liegt. Leitet der Limiter die Erholungsphase ein und nimmt die Pegel-Reduzierung zurück, steigt die Amplitude wieder bis zum Schwellwert des Limiters an. Das Verhältnis der Zeiten und Eingangspegel gibt vor, wie ausgeprägt die Senke ist: je höher der Pegel, desto höher die Pegel-Reduzierung durch den Limiter, umso ausgeprägter die Senke. Je länger das Release des Limiters, desto länger die Senke. Die Länge der Senke entspricht dabei aber nie der tatsächlichen Releasezeit des Limiters, auch die Attackzeit des Kompressors beeinflusst diese. Die Bestimmung der Ausregelzeiten der Limiter wären somit sehr ungenau und vage, weshalb auf eine Dokumentation der Werte verzichtet wurde.

Um die Schwellwerte der Limitierung des Systems in den einzelnen Kanälen zu erfassen, sind unter den in Abschnitt 7.4.1 erläuterten Messaufbau weitere Messungen durchgeführt worden. Dabei war auffällig, dass es in allen, außer in den Mittel- und Hochton-Kanälen, recht früh zu Verzerrungen kam. Ist ein Verstärker gegenüber den Lautsprechern zu klein bemessen und wird von seiner Versorgungsspannung begrenzt, werden die Signalspitzen eines Audiosignals in ihrer Amplitude auf die maximale Ausgangsspannung des Verstärkers beschnitten (Clipping). Das Ausgangssignal folgt außerhalb des linearen Arbeitsbereichs nicht mehr dem Eingangssignal. Im Extremfall resultiert dieses Verhalten in einem rechteckförmigen Ausgangssignal mit einer entsprechend hohen Anzahl an Obertönen. Liegt das verzerrte Signal über einen längeren Zeitraum an den Lautsprechern an, kann es zu einer thermischen Überhitzung kommen und die Lautsprecher werden zerstört. Die durch das Clipping entstehenden Verzerrungen lassen die Wiedergabe rau und angestrengt bis aggressiv klingen. Die Durchsichtigkeit nimmt ab und Ein- sowie Ausschwingvorgänge wirken zunehmend unnatürlich. In Tabelle 7-4 ist das Einsetzen der Verzerrungen in Clicks, dBFS und Spannungswerten aufgeführt.

LS	Verzerrungen ab		Ausgangsspannung
HT	22 Clicks	-24dBFS	7,4V
MT	34 (hinten 28) Clicks	-5dBFS (hinten -13dBFS)	7,4V
TT	28 Clicks	-13dBFS	7,4V
CT	26 Clicks	-16dBFS	7,4V
SUR	Limiter ab 31Clicks	Limiter ab -8dBFS	6,9V
SUB	28 Clicks	-11dBFS	28,3V

Tabelle 7-4: Einsetzen von Verzerrung im Burmester-Verstärker mit 0220 Datensatz. Eigene Darstellung

Die Limiter sind offensichtlich nicht korrekt parametrierung gewesen, sodass die Endstufen ins Clipping gingen. Außerdem wurden „Durchschüsse“ im aufgezeichneten Messsignal festgestellt. Hohe Frequenzen können für den Moment des Einregelvorgangs ungehindert passieren, was darauf schließen lässt, dass die Attackzeit zu lang gewählt ist. Nach Rücksprache und Präsentation der Messergebnisse wurde ersichtlich, dass der verwendete Datensatz NG1C01(0220) im Burmester-Verstärker nicht auf der aktuellen, bereits verbesserten Serienversion NG1C23(0240) basiert. Deutlich wurde dies auch,

nachdem Messungen mit einem aktuellen Datensatz der 9x1 Reihe⁸¹ durchgeführt wurden, in denen nur im TT Verzerrungen über das Oszilloskop beobachtet und keinerlei „Durchschüsse“ mehr festgestellt werden konnten. Somit mussten sämtliche Messungen erneut durchgeführt werden. Die Ergebnisse der nachträglich unter der Softwareversion 0240 durchgeführten Messungen decken sich mit den Erkenntnissen der 9x1 Reihe. Da die Ausgangsspannungen in Version 0240 früher limitiert werden, kommt es in den anderen Kanälen zu keinen Verzerrungen durch die Endstufe. In Tabelle 7-5 sind die Schwellwerte der Limiter und das Einsetzen von Verzerrungen in den Tieftonkanälen ersichtlich.

LS	Limiter bei 0dB input aktiv ab		Ausgangsspannung	Verzerrungen ab
HT vorn	23 Clicks	-22dBFS	5,6V	-
MT vorn	26 Clicks	-16 dBFS	7,5V	-
TT vorn	-	-	7,9V	28 Clicks (-13dBFS)
CT vorn	23 Clicks	-22 dBFS	6,6V	-
HT hinten	28 Clicks	-13 dBFS	6,6V	-
MT hinten	26 Clicks	-16 dBFS	7,4V	-
TT hinten	-	-	7,7V	32 Clicks (-7dBFS)
SUR	28 Clicks	-13 dBFS	6,1V	-
SUB	-	-	34,6V	31 Clicks (-8dBFS)

Tabelle 7-5: Limiter-Threshold und Einsetzen von Verzerrungen. Eigene Darstellung

Der Einsatz von Look-Ahead Limitern stellt eine weitere Verbesserung des Datensatzes 0240 gegenüber 0220 dar. Die Verwendung dieser führt einerseits zu einem weicheren Einstieg in die Limitation, sodass Verzerrungen je nach Frequenz und Regelzeit verringert werden und andererseits dazu, dass auch Pegelspitzen unterhalb der Regelzeit erfasst und limitiert werden. „Durchschüsse“, wie sie unter Datensatz 0220 im Hochtonbereich zu erkennen sind, kommen unter dem neueren Datensatz 0240 nicht mehr zustande. Plötzliche Pegelsprünge im hochfrequenten Bereich (10kHz), werden wirkungsvoll abgefangen und führen somit zu keinerlei Verzerrungen mehr. Der psychoakustische Effekt der Rückwärtsverdeckung (Premasking) verhindert bei einem entsprechend kurzen Look-Ahead, dass die Gain-Reduzierung vor der Pegelspitze wahrgenommen wird. Premasking tritt nach Zwicker und Fastl in einer Zeitspanne von bis zu 20ms auf und ist auch für geübte Hörer nur schwer erkennbar.⁸²

Da der vorgeschaltete Kompressor die Abbildung des Kurvenverlaufs des Limiters beeinflusst, konnten die Attackzeiten der Limiter nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Fest steht, dass sie mit Regelzeiten unter 2ms in den Mittel- und Hochtonkanälen arbeiten. Anhand der Messaufnahmen ist aufgrund des niedrigen Frequenzbereichs und den daraus resultierenden langen Periodendauern eine Abschätzung der Attackzeit in den Tieftonkanälen nicht möglich. Die Releasezeiten lassen sich aus selbigem Grund nicht erkennen. An der Länge der Senke lässt sich die Releasezeit, wie zuvor beschrieben, nur grob abschätzen.

⁸¹ Porsche Sportwagenplattform

⁸² Vgl. ZWICKER, FASTL (1999), Seite 82

7.4.3 Mechanische und thermische Schutzlimiter

Zum Schutz der Lautsprecher vor Zerstörung durch die bewusst überdimensioniert gewählten Crown-Endstufen wurden zwei weitere Limiter in den Signalweg implementiert. Beide Limiter wurden auf Grundlage der Lautsprecherdaten im Pflichtenheft⁸³ berechnet. Als Berechnungsgrundlage diente die Angabe der maximalen Dauerbelastbarkeit der Lautsprecher, welche der Höchstleistung, die ein Lautsprecher ohne bleibenden Schaden über einen längeren Zeitraum umsetzen kann, entspricht. Der Zulieferer gab an, die Dauerbelastbarkeit der Chassis nach IEC Standard 268-1 bestimmt zu haben. Hier wird ein gefiltertes, rosa Rauschen mit einem Crest Faktor von 1,4110 (was 3dB entspricht) genutzt, welches in seiner frequenzmäßigen Gewichtung der Musikkwiedergabe recht ähnlich ist, wenn auch kritisiert wird, da es aktuelle Pop-Produktionen durch Unterbetonung des Tieftonbereichs unzureichend nachempfendet.⁸⁴ Der Crest-Faktor entspricht dem eines Sinussignals und ist deutlich geringer als in der Musikproduktion üblich⁸⁵. Über die Impedanzen und Dauerbelastbarkeiten wurden die Ausgangsspannungen, welche die Chassis über einen längeren Zeitraum standhalten, berechnet. Diese maximalen Spannungen sind aufgrund der Regelung im BSS-Controller in dBu Werte umgerechnet worden. Die Endstufen wurden auf einen Voltage-Gain von 19,1dBu (bei 0dBu, 0,775V Eingangspegel) begrenzt. Liegen am Eingang des BSS-Controllers +12dBu an, so erhält man am Ausgang der Endstufen maximal 27,82V. Um die Schwellwerte der Limiter zu erhalten, muss nun die maximal zulässige Spannung der Chassis (dBu) von der maximalen Ausgangsspannung der Endstufen (dBu) abgezogen werden. Um die Limiter auf den Arbeitspunkt (0dBFS Eingang = 12dBu Ausgang) des BSS-Controllers zu bringen, müssen die dBu Werte abschließend noch um 12dBu erhöht werden.

Center Impedanz 2 Ohm, Dauerbelastbarkeit 50W

Zulässige Ausgangsspannung: $U = \sqrt{P \cdot R} = 10V$ $L = 20 \cdot \log \frac{U}{0,775} = 22,2 \text{ dBu}$

Voltage Gain: 19,1dBu bei 0dBu Eingang, bei 12dBu Eingang 31,1dBu = 27,82V am Ausgang

Limiter Threshold: 22,2dBu – 31,1dBu = -8,9dBu

0dBFS im BSS-Controller bei 12dBu: Limiter-Poti bei -8,9dBu + 12dBu = **3,1dBu**

Tabelle 7-6: Berechnungsbeispiel des RMS-Limiters für den Center-LS. Eigene Darstellung

Die in Tabelle 7-6 aufgeführte Berechnung wurde für alle Chassis durchgeführt und anschließend in den Controller eingepflegt. Anschließend wurden bei 12dBu am Eingang des BSS-Controllers die Spannungswerte am Ausgang mit einem Multimeter überprüft. Dabei kam es zu geringfügigen Abweichungen, welche direkt korrigiert wurden. Selbige Prozedur wurde für die Berechnung der Peak-Limiter, welche die Lautsprecher vor mechanischer Zerstörung schützen sollen, durchgeführt. Da keinerlei Messungen für die maximale Spitzenbelastbarkeit der Chassis vorlagen und laut dem Zulieferer

⁸³ Porsche G1 Panamera Top Premium Soundsystem – Pflichtenheft Version 1.04

⁸⁴ Vgl. NOSELLI (2001), Seite 2

⁸⁵ Pop-Musik 10-15dB

auch nicht erstellt worden sind, wurden auf dessen Empfehlung hin die Werte der Dauerbelastbarkeit um den Faktor zwei, bzw. drei (HT) erhöht und für die Berechnung herangezogen. Diese berechneten Werte sollen einen sicheren Betrieb der Lautsprecher auch unter maximalem Eingangspegel gewährleisten.⁸⁶

Die Regelzeiten der Schutzlimiter unterscheiden sich je nach Kanal und Funktion des Limiters. Um die Dynamik des Signals nicht schon durch die RMS-Limiter, welche deutlich vor den Peak-Limitern ansprechen, zu begrenzen, werden hier entsprechend lange Regelzeiten verwendet. Kurze Impulse und Transienten, welche für die Thermik des Chassis unbedenklich sind, bleiben so erhalten. Das Beschneiden von Transienten im Hochtönen führt schnell zu einem mulmigen Klang. Bei starker Limitierung mit zu kurzen Regelzeiten wirkt ein Musikstück, subjektiv betrachtet, lebloser und undifferenzierter. Abhängig vom jeweiligen Lautsprecher wurden unterschiedliche Attack- und Release-Werte festgelegt. Wie bereits im Grundlagenteil beschrieben, führen falsch gewählte Regelzeiten zu nichtlinearen Verzerrungen und unerwünschten Artefakten. Die Attackzeiten für die mechanischen Schutzlimiter wurden auf den kurz möglichsten Wert eingestellt.

⁸⁶ Eine Excel-Tabelle, welche einen Überblick über die Berechnungen gibt, findet sich auf der CD im Anhang unter dem Namen „Limiter Berechnungen.xlsx“.

8 Auswertung und Optimierungsansatz der bestehenden Kompressor-/ und Limiter-Parameter

Die im G1 unter dem aktuellen Datensatz 0240 ermittelten Kompressor- und Limiter-Parameter haben ihren Einsatzzweck deutlich werden lassen. Die Limiter, in Version 0240 mit Look-Ahead Funktion ausgestattet, sind mit kurzer Attack- und langer Releasezeit eingestellt, dienen dem Schutz der Lautsprecher vor den zu gering dimensionierten Endstufen und tragen maßgeblich zur Verbesserung des Klirrverhaltens des Systems bei. Um den Übergang in die Limitation sanfter zu gestalten, werden Kompressoren mit einem Threshold, der nur geringfügig unterhalb dem der Limiter liegt, eingesetzt. Diese sollen das Signal an die Limitierung heranführen, was aufgrund der identischen Kompressor-Parameter bei unterschiedlicher Gain-Struktur nicht in allen Kanälen funktioniert. Im Center, Hochtönen vorn und den Surroundkanälen, ist kein aktiver Kompressor auszumachen. Die ermittelten Regelzeiten sind mit im Schnitt 300ms Attack und 400ms Release großzügig ausgelegt, sodass Transienten sowie kurze Impulse nicht komprimiert und Bassanteile unverzerrt wiedergegeben werden können. Bevor Untersuchungen hinsichtlich Parameter-Optimierung der Kompressoren behandelt werden, werden im folgenden Abschnitt Fragen hinsichtlich der Optimierung der Limiter-Parameter geklärt.

8.1 Limiter-Parameter – Auswertung und Optimierungsansätze

8.1.1 Verzerrungen der Tieftonkanäle

Aus messtechnischer Sicht verwunderlich ist, dass es in den Tieftonkanälen und dem Subwooferkanal im Grenzbereich des Systems zu Verzerrungen kommt. Die Auswertung der Messergebnisse lässt vermuten, dass im gesamten Arbeitsbereich des Systems (0-40 Clicks) in den Tieftonkanälen kein Limiter zum Einsatz kommt.



Abb. 8-1: Elektrische Messung Tiefton vorne, 20 bis 29 Clicks bei 0dB Eingang. Eigene Darstellung

Wie in Abbildung 8-1 zu erkennen, nimmt der Pegel bis zum Einsetzen von Verzerrungen bei Click 28 zu. Eine Begrenzung des Signals setzt ab Click 29 (etwa -11dBFS, 7,9V) ein. An dieser Stelle ist bereits die maximal mögliche Ausgangsspannung erreicht und mit jeder Pegelerhöhung kommt es zu einer Verstärkung der nichtlinearen Verzerrungen. Diese Verhaltensweise des Signals lässt keine Rückschlüsse

auf den Einsatz eines Limiters zu, außer dieser ist mit einem sehr geringen Threshold und im Gegensatz zu den anderen Kanälen mit einem sogenannten Clip-Limiter ausgestattet. In diesem Fall wäre der Leistungsgewinn (dB SPL_{max}) einem geringeren Klirr vorgezogen worden. Ein Clip-Limiter (Brick-Wall-Limiter) verhält sich dabei ähnlich wie die Endstufe und begrenzt das Signal ab dem Threshold durch „Beschneidung“ der Hüllkurve, was in einem geradlinigen Spannungsverlauf resultiert und ähnliche Verzerrungen verursacht. Durch die elektrische Messung, welche in Abbildung 8-2 dargestellt ist, wird die Verwendung eines Clip-Limiters jedoch widerlegt.

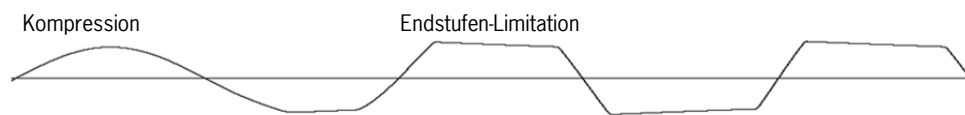
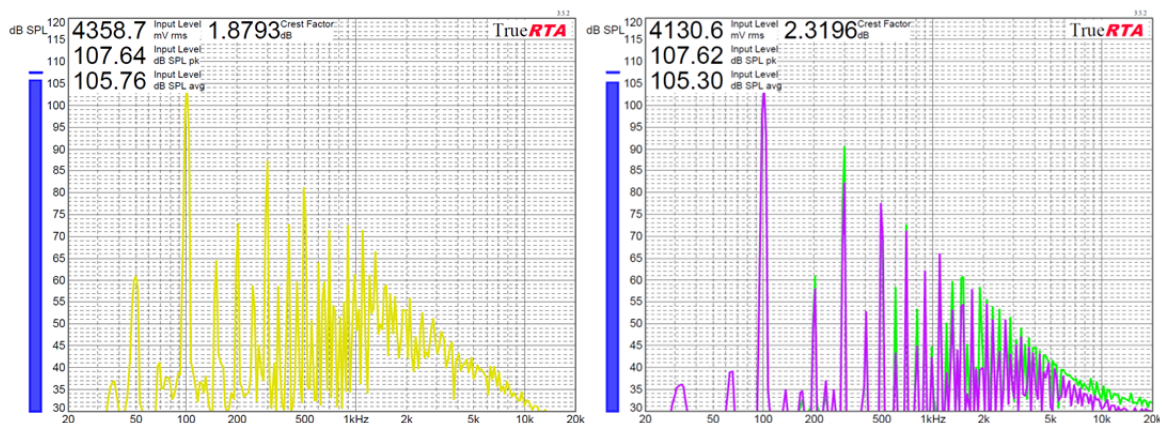


Abb. 8-2: Elektrische Messung des Ausgangs des Tieftonkanals VR, Sinus bei -10dB und 0dB Input (30 Clicks).
Eigene Darstellung

Dargestellt wird die Verzerrung des Tieftonkanals vorne rechts bei 30 Clicks mit einem Sinuston als Eingangssignal. Es wird deutlich, dass die Versorgungsspannung, erkennbar an der abfallenden, bzw. steigenden Geraden während der Limitierung, wegbricht. Dies spricht gegen die Verwendung eines Clip-Limiters, denn bei diesem wäre der Spannungsverlauf horizontal linear.

Verzerrungen werden im Bassbereich schwächer wahrgenommen als im Mittenbereich und Obertöne werden je nach Ausprägung durch die Grundschiwingung verdeckt. Besonders die Vielfachen der Grundfrequenz k3, k5, usw., welche in einem Hörversuch und einer Messung festgestellt wurden und als ungeradzahlig harmonische bezeichnet werden, erklingen in einem gedeckten und hohlen Klang.⁸⁷



Links Abb. 8-3: Frequenzgang TT vorne rechts, 100Hz, 30 Clicks, Tür offen
Rechts Abb. 8-4: Frequenzgang TT 30L geschlossenes Gehäuse, 100Hz, Grün: Burmester, Lila: Diodenschaltung.
Eigene Darstellungen

In Abbildung 8-3 ist der Frequenzgang des Tieftonlautsprechers vorne rechts bei 30 Clicks unter Einspielung eines 100Hz Sinus abgebildet. Gemessen wurde bei offener Tür im Abstand von 20cm auf

⁸⁷ Vgl. SENGPIEL (2008), Seite 1

Achse des Chassis ohne Lochgitter. Deutlich zu erkennen sind die Vielfachen der Grundfrequenz, welche bei 200Hz, 300Hz, 400Hz und 500Hz liegen. Bei 50Hz und etwa 160Hz liegen Resonanzen vor, welche nicht den Verzerrungen durch die Endstufe entstammen. Deutlich wird dies in Abbildung 8-4: hier wurde zum Vergleich der Frequenzgang des TT in einem geschlossenen 30L Gehäuse bei identischem dB SPL gemessen (grüner Verlauf). Der psychoakustische Effekt der Simultanverdeckung führt, da pegelabhängig dicht beieinander liegende Töne verdeckt werden und somit nicht hörbar sind, dazu, dass die prägnanten Obertöne und Resonanzen bei 50Hz 160Hz, 200Hz, 300Hz und 400Hz nicht einzeln wahrnehmbar sind. Die maskierten Töne können allerdings zu einer Rauigkeit des Maskers führen.⁸⁸ Nach Zwicker kann der hörbare Frequenzbereich in 25 Gruppen unterteilt werden. Die Einheit dieser Frequenzgruppen ist nach Heinrich Barkhausen benannt in Bark und gilt als Maß für die Frequenzauflösung des Gehörs. Eine Verdoppelung des Bark-Wertes bedeutet eine doppelt so hoch wahrgenommene Tonhöhe.⁸⁹ Unterhalb von 500Hz verläuft diese linear, 1 Bark hat dabei 100Hz. Die „Verdeckungsflanke“⁹⁰ zu tiefen Frequenzen hin wird mit 27dB/Bark angegeben. Zu hohen Frequenzen lässt sich die Steilheit der „Verdeckungsflanke“ näherungsweise mit einer Gleichung nach Genuit berechnen.⁹¹ Durch das Einsetzen der gemessenen Frequenz f_{KE} (100Hz) und dem Pegel L_{KE} (105dB SPL) der sogenannten Kernerregung (Schallanteile innerhalb einer Frequenzgruppe) erhält man die Flankensteilheit in dB/Bark.⁹²

$$S_1 = \left(-24 - \frac{230\text{Hz}}{f_{KE}} + 0,2 * \frac{L_{KE}}{dB} - 1,95 * 10^{-6} * \left(\frac{L_{KE}}{dB} \right)^3 \right) \text{dB/Bark}$$

Das Ergebnis von etwa 7,5 dB/Bark Steilheit der Maskierungsflanke deckt sich weitestgehend mit dem oben beschriebenen Höreindruck. In der Tabelle von Zwicker und Fastl entsprechen 5 Bark 510 Hz.⁹³ K5 mit 500Hz ist bei Click 28 bereits hörbar und wird nicht vollkommen verdeckt. Mit zunehmender Clickzahl kommen weitere, höhere und hörbare Obertöne hinzu. Obertöne, welche nicht dem Vielfachen der Grundfrequenz entsprechen, entstehen u.a., wenn der Dämpfungsfaktor⁹⁴ der Endstufe für den Moment der Verzerrung bei 0 liegt. Das Ausschwingverhalten der Membran verschlechtert sich maßgeblich und der Lautsprecher entwickelt laut Achim Huber eine Eigendynamik, welche in weiteren, unerwünschten Resonanzen und einer unpräzisen Wiedergabe resultiert. Während des Hörversuchs wurden um resonante Schwingungen, welche durch das Interieur entstehen, auszuschließen, auch Hörversuche mit einem baugleichen Tieftöner in einem geschlossenen 30L Gehäuse am Burmester-Verstärker durchgeführt. Die Verzerrungen des Chassis an sich sind ohne die Einflüsse der

⁸⁸ Vgl. GÖRNE (2011), Seite 125

⁸⁹ Vgl. ZWICKER, FASTL (1999), S.160

⁹⁰ Vgl. MASCHKE, JAKOB (2010), Seite 605

⁹¹ Genuit, K.; Blauert, J.; Bodden, M.; Jansen, G.; Schwarze, S.; Mellert, V.; Remmert, H.: Entwicklung einer Messtechnik zur physiologischen Bewertung von Lärmeinwirkungen unter Berücksichtigung der psychoakustischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs. FB 774.

Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1997

⁹² Vgl. MASCHKE, JAKOB (2010), Seite 605

⁹³ Vgl. ZWICKER, FASTL (1999), Seite 159

⁹⁴ Dieser gibt an, inwieweit sich die Ausgangsspannung der Endstufe von dem angeschlossenen Lautsprecher beeinflussen lässt.

Fahrzeugverkleidung noch deutlicher zu hören gewesen. Um diese mittels Limiter ohne hohen Pegelverlust zu reduzieren, schlug Huber vor, die Verzerrung der Tieftonlautsprecher mit Bursts zu untersuchen. Dies lasse realistischere Betrachtungen, die näher an impulsartigen Signalen, wie sie bei der Musikwiedergabe vorkommen, zu. Das für diesen Zweck erstellte Testsignal erinnert in seiner Hüllkurve an eine gespiegelte Sägezahnspannung. Durch den abfallenden und ansteigenden Amplitudenverlauf können Signale wie die von einer Bass-Drum oder einem E-Bass nachgebildet werden. Des Weiteren war es notwendig, die Tieftonkanäle künstlich zu verzerren. Aufgrund der ersten Annahme, ein künstliches Verzerren der Signale mit dem BSS-Controller sei aufgrund seiner integrierten Schutzlimiter an sich nicht möglich, wurde für die beiden vorderen Tieftonkanäle eine Verzerrer-Stufe nach dem Schaltbild in Abbildung 8-5 konstruiert.

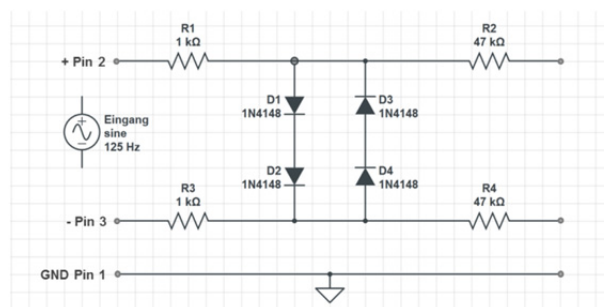


Abb. 8-5: Verzerrerschaltung Symmetrisch XLR. Eigene Darstellung

Über ein Oszilloskop ließ sich die Verzerrung der Automotive-Endstufe mit der der Diodenschaltung vergleichen. Dabei fiel auf, dass die Kanten im Spannungsverlauf, welche durch die Übersteuerung der Verzerrerstufe entstehen, etwas flacher ausfallen und dem Verlauf eines Soft-Clip-Limiters ähneln. Versuche mit insgesamt sechs Dioden führten nicht zu dem gewünschten „kantigeren“ Ergebnis. In Anbetracht des Aufwands für weitere Überlegungen und der ohnehin schematischen Betrachtung wurde die Schaltung wie in Abbildung 8-5 dargestellt belassen. Nun konnte die Diodenschaltung in den Audioflow eingebunden werden. Dazu wurden im BSS-Controller die Tieftonkanäle vor der Endstufe über Ausgang 17 und 18 ausgegeben, durch die Schaltung geführt und in Eingang 7 und 8 wieder dem Signalfloss im BSS-Controller zugeführt. Über den Ausgangspegel des BSS-Controllers ließ sich nun die Stärke der Verzerrung kontrollieren und über das Return Signal seine Lautstärke. So wurde der Frequenzgang des TT-Chassis im 30L Gehäuse unter Verwendung der Diodenschaltung über akustische Vergleichsmessungen dem des Burmesterverstärkers bei 30 Clicks unter Beobachtung eines Realtime-Analyser weitestgehend angepasst.⁹⁵ Da im Nachhinein festgestellt wurde, dass sich die Eingänge des BSS-Controllers doch durch Übersteuerung verzerren lassen, konnte die Verzerrung noch besser abgebildet werden. Dazu wird der Eingang des BSS-Controllers durch die Rückführung des Ausgangs der Tieftonkanäle (identisches Routing wie unter Verwendung der Diodenschaltung) übersteuert. Über eine zusätzliche Gain-Stufe kann der Grad der Verzerrung eingestellt werden. Der Übergang des Sinustons in die Verzerrung ähnelte nun noch mehr der des Burmester-Verstärkers. Für die Reproduktion der

⁹⁵ Siehe Abbildung 8-5

Verzerrung sind folgende Einstellungen im Pegelflow notwendig: RME Fireface-uc: Ausgang -1,8dB, Mic Gain +11dB (nur für Messungen über Dämpfungsglied relevant); BSS-BLU100: Output Gain TT -4dB, rückführender Eingang +18dB, Ausgleichs-Gainstufe -14dB.⁹⁶ Da der BSS-Controller nicht über Limiter mit Look-Ahead Funktion verfügt, musste außerdem eine wie im Fahrzeug angewandte Look-Ahead Funktion nachgebildet werden. Dazu wurden alle Kanäle gegenüber dem Sidechain der Kompressoren der vorderen Tieftonkanäle um 2ms verzögert. Die Nutzung von Limiter-Modulen war nicht möglich, da diese nicht über die Möglichkeit einer von extern ansteuerbaren Sidechain verfügten. Durch die RMS-Analyse des Kompressors glich der Hüllkurvenverlauf der Limitation durch den Kompressor des BSS-Controllers der der Limitation im Fahrzeug, allerdings nur zu tiefen Frequenzen hin.

Nun war es möglich, im Fahrzeug unter ähnlichen Bedingungen die Verzerrungen mit dem BSS-System zu hören, um eine eventuelle Limitierung klanglich zu bewerten. Die erstellten Burst-Signale wurden über beide Systeme abgespielt und unter den in Kapitel 7.3.1 beschriebenen Messaufbau aufgenommen. Dies ließ nun eine Betrachtung der Veränderung der Verzerrung über die Zeit zu. Dabei stellte sich heraus, dass eine Limitation der Tieftöner einen zu großen Leistungsverlust mit sich bringen würde. Betrachtet man zum Beispiel das durchschnittliche Spektrum eines typischen Rock-Titels, fällt auf, dass der Tieftonbereich gegenüber dem Mittel- Hochttonbereich etwa 10dB angehoben ist. Würde man nun die Tieftonlautsprecher, um Verzerrungen zu vermeiden, entsprechend limitieren, würde dies zu einem starken Rückgang der Lautstärke und zu einem Ungleichgewicht der Klangbalance führen. Betrachtet man die Verzerrung der Tieftöner bei 0dB Input und 30 Clicks, lässt sich abschätzen, dass rund 4,5dB an Spannung verloren gingen, respektive 9dB Leistung. Die durch die Verzerrung generierten Obertöne werden durch den Mitteltöner weitestgehend maskiert und suggerieren Lautstärke. Das System erreicht durch die harte Limitierung im Tieftonbereich einen höheren maximalen Schalldruckpegel. Allerdings geschieht dies zum Nachteil der Klangqualität und Souveränität des Systems. Die Wiedergabe wird zu hohen Lautstärken hin (ab Click 27) unpräzise und schwammig: Durch Verzerrungen wird die Abbildungsfähigkeit im Panorama vermindert (Lokalisationsschärfe nimmt ab) und die Darstellung vom Mitteltonbereich wird durch gleichfrequente Störungen verschlechtert. Weiterhin resultieren Verzerrungen in einer Rauigkeit der Wiedergabe. Eine gute Vergleichsmöglichkeit der Wiedergabe mit ausreichend Leistung im Tieftonbereich bietet das BSS-System. Hier gelingt die Wiedergabe aufgrund der nicht auftretenden Verzerrungen deutlich natürlicher. Die Durchsichtigkeit der Mischung sowie das Klangfarbengleichgewicht bleiben zu höheren Pegeln länger erhalten, die Dynamik uneingeschränkt. Die Wiedergabe ist weniger rau. Erst der Klirr der Lautsprecher und das Anschlagen der Schutzlimiter führt bei extremer Lautstärke zu ähnlich klanglichen Ergebnissen wie durch die Fahrzeug Endstufe. Durch die Verwendung von Softclip-Limitern ließen sich die Verzerrungen abschwächen, ohne die Spannung zu stark zu reduzieren. Wie schon im Grundlagenteil beschrieben, beschneiden diese Limiter das Signal in ihrer Amplitude nicht hart, sondern gestalten den Übergang in

⁹⁶ Die Audio Architect Session in welcher die Verzerrung implementiert ist, findet sich auf im Anhang auf der CD „G1 TT Verzerrung.audioarchitect“.

die Verzerrung sanfter. Es gilt zwischen Leistungseinbußen und Klirrverhalten des Systems abzuwägen. Da das BSS-System über keine Softclip-Limiter verfügt, war eine Untersuchung an dieser Stelle nicht möglich.

Für kommende Fahrzeuggenerationen soll nach Wunsch von Porsche die Wiedergabe zu hohen Lautstärken hin bei gleichem SPL mehr Souveränität im Tieftonbereich aufweisen. Den Ergebnissen nach zu folgern, kann dies vor allem durch mehr Leistung an den Lautsprechern erreicht werden. Durch das Herabsetzen der Impedanz der Tieftonlautsprecher auf 10 Ohm wird im zukünftigen G2 die Ausgangsleistung der Tieftonkanäle weiter erhöht. Der Wirkungsgrad der Endstufen wird durch Verwenden von Class D-Technik erhöht. Die vom Zulieferer durchgeführten, bzw. angedachten Maßnahmen stellen das Maximum der Ausreizung der zur Verfügung stehenden Leistung unter der zur Verfügung stehenden Spannung dar. Ein Arbeiten unter 48V Bordnetzspannung würde die Leistungsfähigkeit des Systems maßgeblich steigern und in einer größeren Spielfreude und Leichtigkeit der Wiedergabe, ähnlich des BSS-Systems, resultieren. Eine Architektur, basierend auf 48V Bordnetzspannung, hätte somit großes Potential für eine Klangverbesserung des Systems im High-Volume Bereich.

8.1.2 Ermittlung und Optimierung der Limiter-Parameter im Systemzusammenhang

Das Einsetzen der Limitation zu unterschiedlichen Pegeln führt im Grenzbereich des Soundsystems zu einem klanglichen Ungleichgewicht. Abbildung 8-4 macht deutlich, ab wann in dBFS die Limitation in den Kanälen einsetzt. Auffällig ist, dass die Hochtöner und der Center vorn bereits ab -22dBFS (23 Clicks) limitiert werden und damit bei 32 Clicks deutlich leiser sind als z.B. die Tieftöner hinten, die erst jetzt limitiert werden. Anzumerken bleibt, dass die Messungen, wie schon in Abschnitt 7.4 erwähnt, mit einem Sinussignal (Crest-Faktor 3dB) durchgeführt wurden. D.h., das Ungleichgewicht macht sich je nach Musikprogramm erst im oberen Grenzbereich bemerkbar. Spielt man das Metallica Album „Death Magnetic“⁹⁷ oder andere aktuelle und stark komprimierte Produktionen über das System ab, macht sich die Limitation deutlich früher bemerkbar als bei E-Musik.

⁹⁷ Laut diversen Internet-Quellen liegt der Crest Faktor hier im Bereich um die 5dB

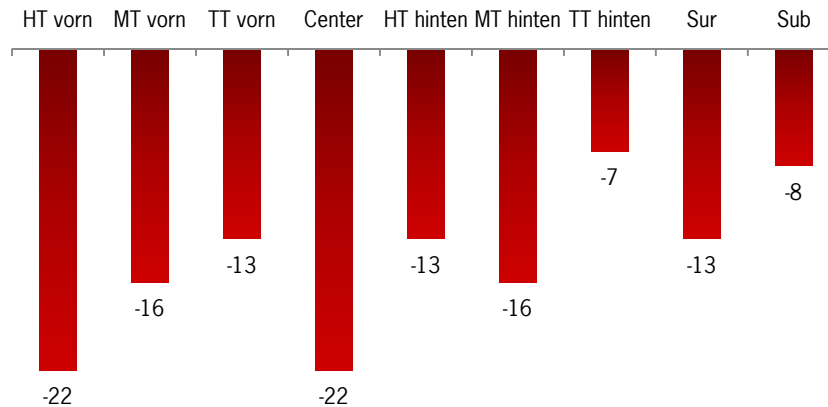


Abb. 8-6: Einsetzen der Limiter im G1 v23 (Threshold dBFS). Eigene Darstellung

In Hörversuchen mit verschiedenen Musikstilen waren die Auswirkungen der Limitation im durchschnittlich ab Click 27 zu hören und wurden von dort an zunehmend stärker. Am auffälligsten war, dass der Tieftonbereich mit jedem Click mehr in den Vordergrund trat. Das Lautstärkegleichgewicht der Mischung gerät außer Balance und das Klangfarbengleichgewicht der einzelnen Instrumente im Bassbereich ebenso. Vermeiden ließe sich das klangliche Ungleichgewicht nur, wenn alle Kanäle auf das Niveau der Hochtöner vorn gebracht, also ab -21dBFS limitiert werden würden, was aber mit starken Leistungseinbußen im maximalen Schalldruck des Systems einherginge. Würde man nun die Regelung der Volumenkurve dahingehend ändern, dass das System erst bei einer höheren Clickzahl in die Limitation geht, verliert man bei leisen und dynamischen Aufnahmen Headroom. Eine denkbare Möglichkeit wäre, die Volumenkurve abhängig von gewählten Klangpresets zu variieren. Letztendlich würde keine Lösung die Schwellwerte der Limitation und damit den maximalen Schalldruck, welchen das System wiedergeben kann, heraufsetzen. In Hörversuchen wurde das Wiedergabeverhalten zu hohen Schalldrücken hin allerdings als angenehm empfunden, da das System im Mittel- Hochtönenbereich eine Lautstärke erreicht, in dem es zunehmend schneidend und unangenehm klingt. Es wurde festgestellt, dass bei Click 26 bis 28 die Wiedergabe als schärfer als bei Click 29/30 empfunden wird, was sich mit der Zunahme der Tieftonwiedergabe ab Click 29 erklären lässt. Bei Hörversuchen unter Kollegen wurde das Lautstärke-Ungleichgewicht als sinnvoll erachtet. Weiterhin bleibt festzuhalten, dass die Dynamik der Musiken sich merklich verringert und die Limitation die Wiedergabe zunehmend gepresst und undifferenziert klingen lässt. Abbildung 8-7 soll einen Überblick geben, wo die Grenzen des Soundsystems im Vergleich liegen.

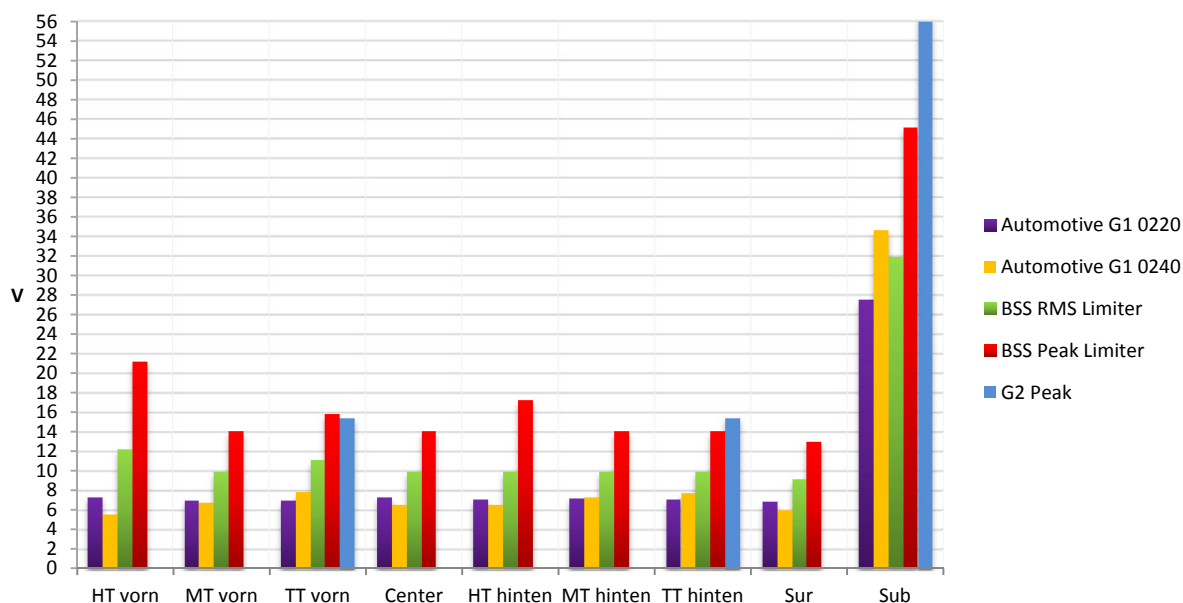


Abb. 8-7: Limitierung der Ausgangsspannung im Vergleich. Eigene Darstellung

Die grünen Balken zeigen die auf Grundlage der angegebenen Dauerbelastbarkeit berechneten RMS-Limiter. Es wird deutlich, dass in beinahe allen Kanälen die Begrenzung vor der maximalen Belastbarkeit der Chassis erreicht wird. Das Herabsetzen der Limiter-Schwellwerte in Kanälen, bei denen es im Datensatz 0220 noch zu Verzerrungen kam, macht deutlich, dass die Endstufen in ihrem Grenzbereich arbeiten und das begrenzende Element darstellen. Im Mittelton wurden die Verzerrungen am Ausgang durch das Herabsetzen des Threshold um nur 0,2V vermieden. Verzerrungen im Tiefton- und Subwooferbereich werden aufgrund der Tatsache, dass sie im Kontext nicht hörbar sind, akzeptiert. Die blauen Balken zeigen die Spitzenbelastbarkeiten der zukünftigen im G2 verbauten Chassis an. Hier ändern sich lediglich die Tieftonlautsprecher und der Subwoofer. Durch das Herabsetzen der Impedanz wird bei den Tieftönern durch den erhöhten Stromfluss die maximal umsetzbare Leistung noch weiter erhöht. Die maximal verträglichen Ausgangsspannungen bleiben die gleichen. Beim Subwoofer wurde die Impedanz sogar von 3,4Ω auf 4Ω angehoben. Der Lautsprecher lässt nun, ohne beschädigt zu werden, deutlich höhere Spannungen zu. Die Spitzenbelastbarkeiten der im G1 verbauten Chassis (rote Balken) machen deutlich, wie sehr die Dynamik durch die Endstufen eingeschränkt wird. Denn auch kurze Impulse und Transienten werden von den Systemlimitern erfasst und gedämpft. Hörversuche im Grenzbereich bestätigten die daraus resultierende Annahme, dass die Durchsichtigkeit abnimmt wodurch die Mischung schwammiger wirkt. Jedoch ist ein Erhalten der Transienten aufgrund der mangelnden Leistung der Endstufen nur durch Begrenzen der Ausgangsleistung über die Eingangsämpfung, bzw. Volume-Kurve möglich. Dies ginge mit einem Verlust im maximalen Schalldruckpegel des Systems einher, eines der wesentlichen Eigenschaften des Burmester Soundsystems, und scheint daher nicht erstrebenswert.

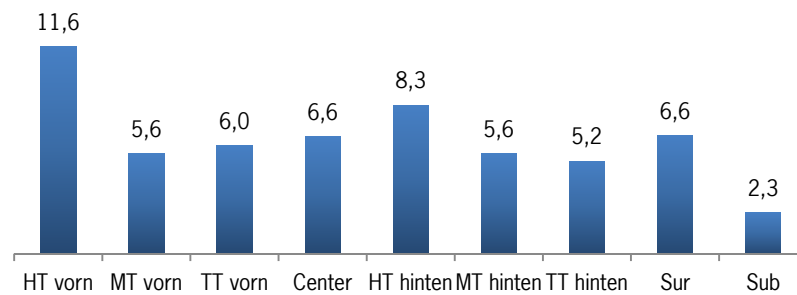


Abb. 8-8: Headroom in dB zwischen dem Einsetzen des BSS-Peak-Limiters gegenüber dem G1-Peak-Limiter. Eigene Darstellung

Abbildung 8-8 zeigt die Differenz der maximalen Peak-Belastbarkeit der Chassis zu der tatsächlichen Limitierung der Kanäle in dB. Es bleiben durchschnittlich 6,4dB, welche die Lautsprecher im Stande wären, über einen kurzen Zeitraum wiederzugeben, ungenutzt. Bei Hörversuchen im Fahrzeug über das BSS-System wurde deutlich, dass die Wiedergabe sauberer und differenzierter gelingt. Die Durchsichtigkeit der Mischung sowie das Klangfarbengleichgewicht bleiben zu höheren Pegeln länger erhalten, die Dynamik uneingeschränkt. Wie zuvor schon beschrieben, könnte das System unter Verwendung von 48V Bordnetzspannung zu hohen Lautstärken hin die Spielfreude und Präzision des BSS-Systems erreichen.

Die Zeiten der Limiter sollten sich an dem jeweiligen wiederzugebenen Frequenzbereich des Kanals orientieren. Typische Attack-Werte eines Look-Ahead-Limiters, wie er im G1/2 zum Einsatz kommt, wären 1-2ms für den Mittel- und Hochtonbereich und 20ms im Tieftonbereich. Die Release-Werte sollten je nach Kanal bei 90-250ms liegen. Leider lassen sich, wie im Abschnitt 8.4.2 erläutert, die Releasezeiten der derzeit eingesetzten Limiter nicht ermitteln. Vermutlich liegen sie im Mittel-, Hochtonbereich je nach Gain-Reduzierung um 100ms, dies lässt die Länge der Senke vermuten. Um Verzerrungen zu vermeiden, sollten nach A. Huber die eingesetzten Ausregelzeiten $4 \cdot T$ nicht unterschreiten. Die Periodendauer einer 30Hz Schwingung beträgt 33ms, mit 132ms wären demnach vier Perioden durchlaufen und 100ms Release für diese Frequenz zu knapp bemessen. Im Tieftonbereich sollte man sich an Zeiten von 250ms orientieren. Dieser Wert liegt noch unterhalb der Erholungszeit des menschlichen Gehörs, gleichzeitig werden Verzerrungen vermieden.

Es bleibt festzuhalten, dass die Schwellwerte der Limiter knapp unterhalb der maximalen Endstufenleistung passend ausgelegt sind. Durch die Look-Ahead-Funktion werden Spannungsspitzen effektiv abgefangen, ohne dass die Attackzeiten zu kurz eingestellt sein müssten. Möglicherweise ist die Releasezeit im Tieftonbereich zu kurz bemessen, Messungen und Hörversuche ließen hier allerdings keine Rückschlüsse zu.

8.2 Kompressor-Parameter – Auswertung und Optimierungsansätze

Mit entsprechend langen Regelzeiten kann es sinnvoll sein, einen Kompressor zur Erhöhung der Lautstärke im Grenzbereich des Systems im Bassbereich einzusetzen. Dazu wird der Schwellwert des Kompressors kurz vor dem Einsatzpunkt des Limiters gesetzt. Durch die Verdichtung des Signals nimmt die wahrgenommene Lautheit im Bassbereich zu, ohne in die Limitation zu geraten. Weiterhin wird der Tieftonbereich dabei sanft in die Limitierung gefahren, ohne abrupt begrenzt zu werden. Wichtig sind dabei die technisch korrekte Parametrisierung, sowie die Bewertung der klanglichen Beeinflussung des Systems durch den Einsatz von Kompressoren im Tieftonbereich. Die in Datensatz 0240 gewählten dynamischen Kompressor Parameter sind großzügig bemessen und lassen keine Verzerrungen der Signale zu. Einschwingvorgänge bleiben erhalten und der Klang natürlich. Durch die lange Attackzeit von 300ms arbeitet der Kompressor als ein Leveller, das heißt, nur längere Überschreitungen des Thresholds werden in ihrem Pegel begrenzt. Diese Herangehensweise ist für den Einsatzzweck der Heranführung an die Limiter als sinnvoll zu erachten, denn das Lautstärke- und Klangfarbengleichgewicht bei kürzeren Überschreitungen wie Impulsen bleibt dadurch bis zum Einsetzen des Limiters erhalten. Die Releasezeit bei hoher Volume von im Schnitt 400ms liegt jedoch oberhalb der Erholzeit des Gehörs und ist damit wahrnehmbar.⁹⁸ Das in Hörversuchen ausgemachte „Pumpen“ ließe sich durch kürzere Releasezeiten unterhalb von 300ms verhindern, jedoch ist der Kompressor im G1 nicht im Stande, von der Gain-Reduction unabhängige Regelzeiten einzuhalten.⁹⁹ Hier würde ein Kompressor mit konstanter Release Abhilfe schaffen. Eine konstante Release würde die Regelvorgänge auch bei längeren Zeiten weniger störend gestalten. Die sogenannte „musikalische Auslegung“ des Kompressors, erreicht durch unabhängig von der Gain-Reduction wirkende identische Regelzeiten, ist aufgrund der Tatsache, dass sich die Regelvorgänge immer in einem gleichem Verhältnis zum musikalischen Metrum befinden, weniger störend.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass das Pumpen merklich von der gewählten Attack-Zeit abhängig ist. Bei einer zu kurz gewählten Attack-Zeit (<100ms) werden die Ausregelvorgänge mit Verkürzen der Zeit zunehmend hörbarer. Bei 200ms Attack sind demzufolge Ausregelvorgänge nur bei hoher Gain-Reduction von mindestens 10dB hörbar. 10dB GR entsprechen je nach Kanal ungefähr 400ms Release. Bei 10dB GR befindet sich der Kompressor aufgrund des zu hohen Eingangspegels und der langen Regelzeiten je nach Musik allerdings bereits in der Dauerkompression (Leveller), was Regelvorgänge, da diese nun wesentlich geringer ausfallen, inaudibler gestaltet. Diese Aussage ist allerdings nicht allgemeingültig. Bei perkussiver Musik mit Klangflächen- oder Hallanteilen sind die Regelvorgänge hingegen deutlich hörbar.

⁹⁸ Vgl. JÜNGLING (2014)

⁹⁹ Siehe Kapitel 8.3.2

Nach Empfehlung von Huber sollten die Zeiten der Kompressoren dem Einsatzzweck als Leveller nach zu folgern, alle dieselben Regelzeiten aufweisen. Dies soll die Regelvorgänge natürlicher gestalten, da bei Signalen, welche z.B. den Tief-, und Mittelton-Kompressor ansprechen, die Ausregelvorgänge gleichermaßen stattfinden. Idealerweise würde die Releasezeit programmabhängig arbeiten (sog. Auto-Release), d.h. das Signal würde analysiert und die Releasezeit je nach Takt, Tempo und Frequenz eingestellt.¹⁰⁰ Eine solche Automatisierung ist in vielen Prozessoren optional zuschaltbar und macht die Regelvorgänge weniger wahrnehmbar. Ein Versuch der Verwendung der Auto-Release Funktion im BSS-Controller schloss jedoch eine Nutzung im High-End Bereich aus. Die Funktion produzierte Artefakte und Klangverfärbungen.

Eine weitere Möglichkeit, die Regelvorgänge weniger hörbar zu gestalten, bietet die Kopplung der Gain-Reduction der einzelnen Kompressoren. Würde es zu einer ausgeprägten Gain-Reduction im MT-Bereich kommen, so sind aus akustischem Kontext die restlichen Bänder auch etwas im Gain zu reduzieren. Pegeldifferenzen der Kanäle zueinander, welche die Klangbalance verschieben würden, wären so nicht mehr existent. Sorgt man nun für Ausregelzeiten unterhalb der Hörbarkeitsschwelle von 300ms, wären die Regelvorgänge kaum noch hörbar. Mit dem BSS-System lässt sich dieses Verhalten leider nicht untersuchen, eine Kopplung ist hier nicht möglich. Es bleibt zu beachten, dass eine Kopplung zu 100% nicht sinnvoll ist, da hierbei der Leistungsverlust im Tieftöner zu hoch wäre. Eine anteilige Kopplung von etwa 25% ist laut Achim Huber erstrebenswert.

Bei der Vermessung des Systems wurde kein Kompressor vor dem Hochtöner und Center festgestellt. Gerade im Center stellt sich die Frage, ob dies absichtlich so geschehen ist. Konsequenz wäre auch hier, das Signal mittels Kompressor sanft an die Limitation heranzuführen. Eventuell liegt der Grund dafür in einem falsch parametrisierten Threshold, der oberhalb von dem des Limiters liegt. Über eine passende Laufzeitkorrektur kann der Gain des Center zurückgenommen werden, der Kompressor wäre so ohne die Änderung der Parameter wieder aktiv.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die dynamischen Parameter des Kompressors in seiner Funktion als Leveller und das Heranführen an die Limiter eine konstante Attack-Zeit von 250ms und eine konstante Releasezeit zwischen 200 bis 300ms haben sollten. Um Verzerrungen durch die Kompression zu vermeiden, gilt es zu beachten, dass die Attack-Zeit niemals kürzer als die vierfache Periodendauer der tiefsten Wiedergabefrequenz sein sollte. Konstante Regelzeiten sorgen für weniger störende, die Kopplung der Gain-Reduction für weniger wahrnehmbare Regelvorgänge.

¹⁰⁰ Vgl. JESCHKE (2009), Seite 80

9 Untersuchungen zu Delaystrukturen

Wie die akustischen Auswirkungen baulich versetzter Lautsprecher sind, kann in den Abschnitten 4.1.4 und 7.1.2 nachgelesen werden. In den folgenden Abschnitten soll eine sinnvolle Vorgehensweise im Finden von Delaystrukturen aufgezeigt und die klanglichen Auswirkungen dieser beschrieben werden. Das Wort Delay stammt aus dem Englischen und wird mit „Verzögerung“ übersetzt.

9.1 Anordnung der Lautsprecher und daraus resultierende Auswirkungen

Die Anordnung der Lautsprecher im Panamera (G1) entspricht der einer typischen Konfiguration eines High-End-Soundsystems im Fahrzeug. Der AMT ist unterhalb der Windschutzscheibe im Armaturenbrett verbaut (Abb. 9-1 Pos. 1) und nutzt die schallharte Scheibe als Reflexionsfläche, um den Schall über diese ins Fahrzeuginnere zu lenken. Das Gleiche Spiegelschallquellenprinzip nutzt der Centerlautsprecher (Abb. 9-1 Pos. 2). Die Mittelton- und Tieftonlautsprecher sind in den Türen installiert (Abb. 9-1 Pos. 3/4 & 5/6), in den hinteren Türen ist zusätzlich ein Kalottenhohtöner installiert (Abb. 9-1 Pos. 7). In der D-Säule sind die Surround Lautsprecher eingebracht (Abb. 9-1 Pos. 7), während der Subwoofer in seinem eigenen Gehäuse in der Reserveradmulde untergebracht ist (Abb. 9-1 Pos. 8).

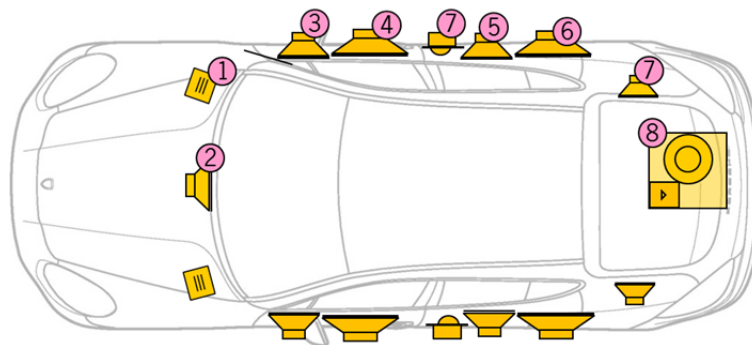


Abb. 9-1: Anordnung der Lautsprecher im Panamera (G1). Eigene Darstellung

Durch die Vielzahl der Lautsprecher und deren unterschiedliche Entfernung zur Hörposition treffen die wiedergegebenen Direktsignale an dieser zu verschiedenen Zeiten ein. Die diesbezüglichen Auswirkungen wurden bereits in Abschnitt 4.1.4 dargelegt. In Abschnitt 9.2 wird durch Mess- und Hörversuche untersucht, inwieweit sich eine zeitliche Optimierung des Tief-, Mittel- und Hochtonbereichs als eine Einheit auswirkt. In Abschnitt 9.3 wird festgestellt, welche Auswirkungen die Verzögerungen von Lautsprechergruppen im Fahrzeug zueinander haben.

9.2 Gruppenlaufzeitentzerrung der jeweiligen Mehrwegesysteme

Die einzelnen Lautsprecher werden für die folgenden Untersuchungen in Gruppen zusammengefasst und innerhalb dieser zeitlich aufeinander abgestimmt. Die vier Gruppen fassen jeweils den Tief-, Mittel-, und Hochtöner vorne links und rechts sowie hinten links und rechts zusammen.



Abb. 9-2: Einbauorte des Tiefton-, Mittelton-, Hochton- und Center-Lautsprecher im Panamera G1. Gruppe 1. Quelle: Porsche

In Abbildung 9-2 wird der bauliche Versatz, der in Wegdifferenzen zwischen den Chassis und der Hörposition resultiert, deutlich. Im Folgenden werden die zwei Türlautsprecher und der Hochtonlautsprecher über eine Laufzeitkorrektur zeitlich aufeinander abgestimmt (orangefarbene Einkreisung).

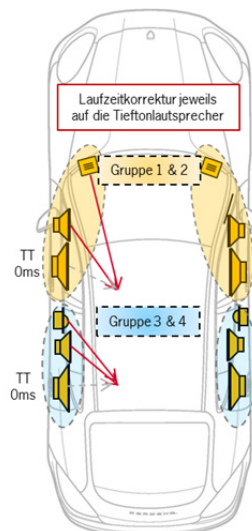


Abb. 9-3: Symmetrische Verzögerung der Lautsprecher innerhalb ihrer Gruppe auf ihre zugehörigen Hörplätze. Eigene Darstellung

Anschließend gilt selbiges Vorgehen für die hinteren Lautsprecher. Abbildung 9-3 soll das Vorgehen verdeutlichen.

9.2.1 Messaufbau und Methodik

Zunächst wird der Messaufbau zum bestimmen der Laufzeitkorrektur erläutert. Als Messsystem kam das DAAS4PRO zum Einsatz. Dies verfügt über ein Interface mit Ein- und Ausgängen, sowie der dazugehörigen Messsoftware. Eingangsseitig wurde ein Messmikrofon der Firma Microtech Gefell (M296) mit Kugelcharakteristik verwendet. Der Line-Ausgang wurde mit den Eingängen des RME-Interface verbunden, welches das Signal weiter an den BSS-Controller sendete. Nach Empfehlung des DAAS-Benutzerhandbuches wurde ein Rosa Rauschen als Messsignal verwendet. Vor jeder Messung wird zur Pegelkontrolle und um zu Verhindern, dass Nicht-Linearitäten des Messsystems mit in die

Berechnungen einfließen, vom DAAS-System eine Referenzmessung durchgeführt. Anschließend wird die tatsächliche Messung durchgeführt. So wurde der Frequenzgang des jeweiligen Lautsprechers bestimmt. Durch die Berechnung der Kreuzkorrelation zwischen Ein- und Ausgangssignal ermittelt das DAAS die Impulsantwort des Systems und durch Faltung dieser mit der Sprungfunktion die Sprungantwort (Step-Response).¹⁰¹ Anhand der Sprungantwort lässt sich das Übertragungsverhalten des gesamten LZI-Systems betrachten, dies beinhaltet sowohl das RME Fireface, den BSS-Controller mit seinen implementierten Modulen, die Endstufen, als auch die Lautsprecher; ausgenommen ist das Übertragungsverhalten des Messsystems. Die Gruppenlaufzeiten der gesetzten Filter im BSS-Controller, welche sich durch ihren Algorithmus und die abweichende Klanganpassung zu denen im G1 eingesetzten unterscheiden, führen u.a. im Tieftonkanal zu zeitlichen Differenzen, was eine 1:1-Übertragung der ermittelten Laufzeiten unmöglich macht. Weiterhin wurde mittels eines Realtime-Analyzers (NTI XL2) das spektrale Verhalten der Gruppen während des Einstellens der Laufzeiten beobachtet. Auswirkungen der Verzögerungen auf den Frequenzgang wurden so unmittelbar sichtbar. Begonnen wurde mit der Lautsprecher-Gruppe vorne links, bestehend aus Tief-, Mittel- und Hochtöner. Zunächst wurde der räumliche Versatz der Lautsprecher zur Fahrerhörposition mit einem Maßband vermessen. Anschließend wurde an unterschiedlichen Orten akustisch gemessen. Gemessen wurde an der Außenohrposition, der gedachten Nasenspitze und der Fahrzeugmitte zwischen den Vordersitzen. Die genauen Messpositionen finden sich auf der CD im Anhang unter der Datei „Delaystrukturen – Messpositionen.pdf“.

9.2.2 Bestimmung der Delayzeiten

Durch die symmetrische Anordnung der Lautsprecher-Gruppen links und rechts im Fahrzeug war es ausreichend, die Messungen einseitig durchzuführen (Fahrerseitig). Zu Beginn wurden die Abstände der einzelnen Lautsprecher zu der Außenohrposition mit einem Metermaß gemessen. Dabei wurden folgende in Tabelle 9-1 abgebildete Werte gemessen:

Kanal	Direkte Messung
HT zum Ohr	95cm
MT zum Ohr	64cm
TT zum Ohr	102cm
CT zum Ohr	113cm

Tabelle 9-1: Direkte Abstandsmessungen der Einzellautsprecher der Lautsprechergruppe vorne links. Eigene Darstellung

Nun wurde die Laufzeitdifferenz zwischen den einzelnen Lautsprechern rechnerisch ermittelt und mit akustischen Messergebnissen verglichen.

Kanäle	Berechnete Differenz		Indirekte akustische Messung
Δ TT HT	7cm	0,2ms	2,417ms
Δ HT MT	31cm	0,904ms	0,813ms
Δ TT MT	38cm	1,108ms	3,23ms
Δ CT MT	49cm	1,429ms	1,333ms

Tabelle 9-2: Direkte und indirekte Abstandsmessungen der Lautsprechergruppe vorne links. Eigene Darstellung

¹⁰¹ ULTEÉ AUDIOTECHNIK (2004), Seite 36

In Tabelle 9-2 werden die Differenzen der Laufzeiten, welche sich zwischen der direkten und indirekten Messung bilden, deutlich. Liegt die Abweichung des Hochtöners zum Mitteltöner bei nur 0,09ms (3cm), sind es beim Tieftöner zum Mitteltöner 2,12ms (72,7cm). Der akustische Laufzeitunterschied lässt sich folglich mit dem Metermaß nicht genau bestimmen. In den Tieftonkanälen unterscheiden sich die Laufzeiten zu den Mittel- und Hochtönern aufgrund der implementierten Filter besonders.

Zuerst wurde über die Sprungantwort der Laufzeitunterschied zwischen dem Mittel- und Hochtontonkanal bestimmt. Anschließend zwischen Mittel- und Tieftonkanal. Die Differenz, welche sich zwischen MT zu TT und MT zu HT ergibt, wurde zu dem ermittelten Verzögerungswert des Hochtontonkanals hinzuaddiert. Es wurde versuchsweise an verschiedenen Orten gemessen. Die Messergebnisse der indirekten akustischen Messung an der Nasenspitzen- und Außenohrposition waren bis auf marginale Abweichungen gleich. Verglich man die Messungen in der Fahrzeugmitte mit diesen, fielen neben anderen Laufzeiten auch klangliche Unterschiede auf.

Neben der reinen akustischen Messung wurde das Delay zwischen dem Mittel- und Hochtontonlautsprecher auch nach Gehör eingestellt. Als Quellsignal wurde hierzu ein rosa Rauschen verwendet. Die Werte aus der akustisch stammenden Messung wurden als Ausgangswert eingestellt. Nun wurde das Delay des Mitteltonkanals verstellt und auf die Ortung der Schallquelle geachtet. Ist das Delay zu lang, verändert sich der Klang des Rauschens in ein hartes Rauschen und die Ortung liegt beim Hochtontonlautsprecher. Bei zu kurz gewähltem Delay wird der Klang des Rauschens vom Mitteltonlautsprecher dominiert und die Ortung liegt bei ihm. Bei einem korrekten Wert klingt das Rauschen ausgeglichen und bildet sich zwischen den beiden Lautsprechern ab. Der Mittel- und Hochtontonlautsprecher bilden eine neue Einheit, welche die zeitliche Zuordnung der Signale unverändert lässt. Am Besten integrierte sich der Hochtontonlautsprecher bei der nach der Sprungantwort ermittelten Laufzeitverzögerung. Springt man im Delay-Modul in der kleinsten Einheit von 10µs um den ermittelten Wert von 2,604ms, stellt man fest, dass der Hochtöner bei diesem Wert die Phantommitte zwischen Center- und Mitteltonlautsprecher am ehesten trifft. Auch das gemessene Delay zwischen Center- und Mitteltonlautsprecher musste nach einem Hörversuch nicht korrigiert werden. Es entstand eine eindeutige Phantommitte auf der Basislinie zwischen den beiden Lautsprechern. Die Sprungantwortmessungen machten deutlich, dass der TT nach der Laufzeitkorrektur des MT zu diesem gegenphasig spielte. Ohne ein Invertieren der Polarität der Tieftonkanäle kann zwar eine effektivere Summation im Betragsfrequenzgang erreicht werden, allerdings resultiert dies in einem „phasigen“ Klang. Die Wiedergabe wirkt gedrückt und nicht so präsent wie mit Invertierung. Diese Erkenntnis deckt sich mit den theoretischen Betrachtungen aus Abschnitt 7.2, wonach durch das Filterdesign eine Invertierung, bzw. Phasenverschiebung an der Trennfrequenz im TT resultiert. Wesentlich für den Höreindruck ist der Amplitudenverlauf¹⁰², welcher durch diese Maßnahme beeinflusst wird. Die Änderungen, welche sich ergeben, sind in Abbildung 9-4 zu erkennen.

¹⁰² Vgl. GOERTZ / WOLFF (2002), Seite 2

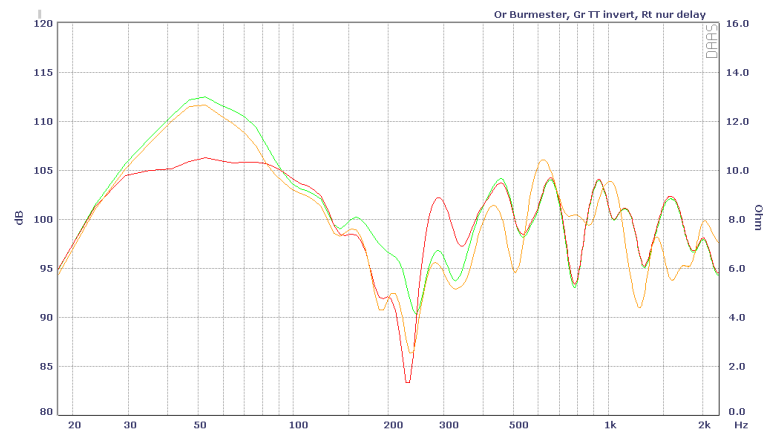


Abb. 9-4: Vergleich Übergangsbereich TT MT nur vorne **links + Sub:**
orange Burmester, rot MT delayed, grün MT delayed + TT invertiert.
Eigene Darstellung

Die Auslöschungen im Bereich von 240Hz (oranger Verlauf), werden durch das Delay im MT und die Invertierung im TT vermindert (grüner Verlauf). Ein Delay des MT gegenüber dem TT ohne diesen zu invertieren, resultiert in dem Amplitudenverlauf der roten Kurve.

Weiterhin wurden Hörversuche zu verschiedenen Referenzpunkten der Laufzeitkorrektur zwischen Mittel- und Tieftonkanal in den Step-Messungen durchgeführt. Es wurden zwei Varianten untersucht: die Verzögerung des MT und HT auf den ersten Amplitudenanstieg und auf die erste Amplitudenspitze der Sprungantwort. In Abbildung 9-5 sind die einzelnen Sprungantworten und die Verzögerung des MT und HT auf den Amplitudenanstieg des TT zu sehen.

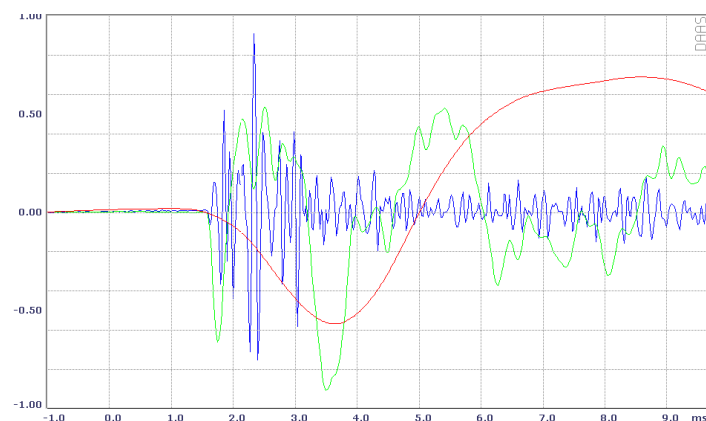


Abb. 9-5: Einzelne Sprungantworten von TT (rot), MT (grün) und HT (blau), auf Amplitudenanstieg.
Eigene Darstellung

Abbildung 9-6 zeigt die Verzögerung des CT und MT auf die Amplitudenspitze der Sprungantwort des TT.

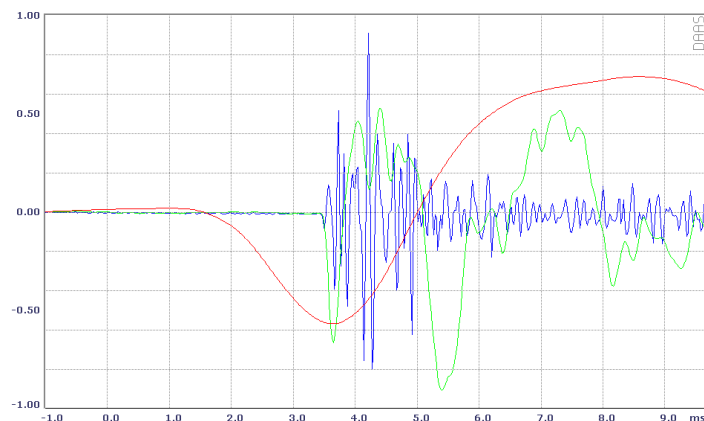


Abb. 9-6: Einzelne Sprungantworten von TT (rot), MT (grün) und HT (blau), auf Amplitudenspitze. Eigene Darstellung

Die verschiedenen Referenz-Zeitpunkte der Verzögerung resultieren in unterschiedlichen Frequenzgängen und Höreindrücken. Abbildung 9-7 zeigt die Frequenzgänge der beiden vorgestellten Varianten sowie den der unverzögerten Variante (orange).

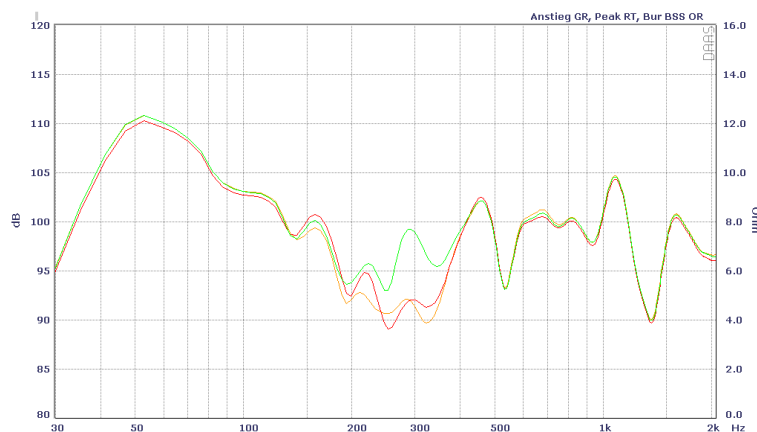


Abb. 9-7: Frequenzgang von TT MT vorne nach Verzögerung auf Amplitudenanstieg (Grün), auf maximale Amplitude (Rot) und ohne Delay (Orange).
Eigene Darstellung

Auch wenn der Betragsfrequenzgang der Variante des Verzögerns auf den Amplitudenanstieg im Grundtonbereich gegenüber den anderen Varianten einen höheren Pegel ausweist, überzeugt dieser im Hörvergleich nicht. Im Gesamtkontext überzeugt wie schon bei der zuvor genannten Tieftön-Invertierung paradoxerweise die Variante mit der Verzögerung der MT und HT auf die Amplitudenspitze (Abb. 9-4). Hierbei ergibt sich das stimmigere Klangbild eines einheitlichen Lautsprechers. Die Bühne ist breiter aufgestellt und „rutscht“ dabei näher zum Hörplatz, wodurch sie direkter und näher klingt. Zudem gelingt der Klang wärmer, wenn auch mit ein wenig Verlust an Präsenz.

9.2.3 Gesamthöreindruck und Ergebnisse

Die Anpassung der Laufzeiten auf die Fahrzeugmitte hin resultiert in einer unnatürlicheren Wiedergabe. Das Signal klingt „phasig“ und die Ortung der Phantomschallquellen gelingt nicht so eindeutig wie bei einer Verzögerung auf den Fahrersitz. Zwischen den Messpositionen äußeres Ohr und Nasenspitze

ergaben sich im Übergangsbereich von MT zu HT leichte spektrale Unterschiede. Eine Mittelung war mit der Messsoftware DAAS nicht möglich, auch stand nur ein Mikrofoneingang zur Verfügung. Im Übergangsbereich vom TT zu MT hingegen waren die Unterschiede zwischen den beiden Messpositionen marginal und dadurch vernachlässigbar. Nach diesen Feststellungen wurde als akustischer Referenzpunkt für alle weiteren Messungen die gedachte Nasenspitze auf der Fahrerseite verwendet.

Durch die Abstimmung der TT, MT und dem HT mittels Laufzeitkorrektur gelingt die Wiedergabe natürlicher. Dies liegt einerseits an dem verminderten Frequenzeinbruch im Bereich der Übernahmefrequenz von TT zu MT, andererseits an der präziseren Lokalisierbarkeit der Phantomschallquellen. Die Instrumente gehen weniger in die Breite und lassen sich gezielter orten. Ohne Laufzeitkorrektur klingt die Bühne auseinander gezerrt und es wird ein künstlicher Eindruck von Räumlichkeit geschaffen. Die Auslöschung im Grundtonbereich lässt sich auch mittels eines Equalizers ausgleichen. In einem Hörversuch wurde jedoch deutlich, dass dies zu einer klanglich unnatürlicheren Wiedergabe führt als die Anpassung durch Laufzeit- und Phasenkorrektur. Im Fondbereich liegen der MT und HT deutlich näher beieinander, entsprechend gering fällt hier auch die Korrektur zwischen den beiden aus. Eine Optimierung der Laufzeiten führt auch hier zu einer natürlicheren Wiedergabe, wenn auch zu einer Überbetonung bei 370Hz. Hier wurde im Burmester-System ein EQ-Punkt gesetzt, welcher die Auslöschung durch die zueinander verschobenen akustischen Phasen ausgleichen soll. Dieser Bereich muss nun um 5dB mit einer Güte von 0,20kt. abgesenkt werden. Die Lokalisierung gegenüberliegender Schallereignisse (links- bzw. rechts im Panorama angesiedelt) gelingt leichter, die Phantommitte wandert mehr Richtung Fahrzeugmitte und befindet sich in etwa vor der Position des Hörers.

9.3 Laufzeitentzerrung innerhalb des Gesamtsystems

In den folgenden Abschnitten wird untersucht, inwieweit sich das Verzögern der einzelnen Gruppen, des Centers, des Subwoofers und der Surround-Lautsprecher zueinander auswirken und welche klanglichen Auswirkungen das Verzögern des Systems auf unterschiedliche akustische Referenzpunkte hat.

9.3.1 Optimierung vorne/hinten spezifisch

Nachdem alle TT-, MT- und HT-Lautsprecher zueinander in ihrer Laufzeit korrigiert und damit klanglich optimiert wurden, galt es, weitere Untersuchungen in Bezug auf Verzögerung der Gruppen zueinander durchzuführen. Eine Variante bestand in der zeitrichtigen Verzögerung der hinteren Kanäle auf die Hörposition des Fahrers. Die vorderen Kanäle wurden in ihren Zeiten so belassen wie in Abschnitt 9.2.2 festgestellt. Die GLZ der hinteren Kanäle wurden über die Sprungantwort von der Fahrerposition aus neu vermessen und auf eine zu den vorderen Lautsprechern zeitrichtige Wiedergabe gebracht.

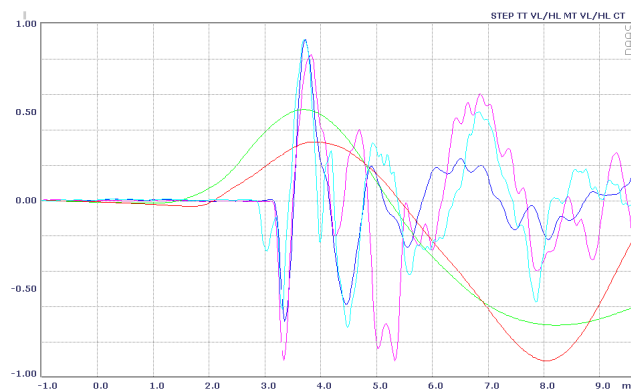


Abb. 9-8: Sprungantworten der einzelnen Lautsprecher. Verzögert auf die max. Amplitude des TT vl gr, TT hl rt, MT vl mag, MT hl cy, CT blau, HT der Übersicht halber nicht abgebildet. Eigene Darstellung

Durch die in Abbildung 9-8 dargestellte Korrektur der hinteren Kanäle wandert das Bühnenbild weiter in die Fahrzeugmitte und die Bühne wirkt noch kompakter. Die Räumlichkeit nimmt weiter ab, die Wiedergabe gelingt natürlich. Es fällt auf, dass sich der Effekt der Umhüllung durch die Klangkulisse aller Lautsprecher mit zunehmender Zeitrichtigkeit des Systems einstellt. Die Bühne wandert mit jeder Optimierung weiter in Richtung Windschutzscheibe und verkleinert sich merklich. Das System verliert an Burmester-typischem Klangcharakter, es wird „ent-emotionalisiert“. So zeitrichtig die Wiedergabe im vorderen Bereich gelingt, so spektral verfärbt ist das Klangbild auf den Fondplätzen. Die damit verbunden Klangeinbußen rechtfertigen nicht die marginale Klangverbesserung auf den vorderen Sitzplätzen zu der nun folgenden Variante.

Hier wurde die korrigierte GLZ der hinteren und vorderen Kanäle beibehalten. Die Fondlautsprecher wurden also relativ zu ihren optimierten Werten auf die Frontkanäle hin verzögert. Die hinteren Lautsprecher der Gruppen 3 und 4, in Blau markiert, werden verzögert, um sie auf die vorderen Gruppen 1 und 2 anzupassen. Dies geschah ausschließlich durch Hörversuche mit unterschiedlichen Musiktiteln und rosa Rauschen. Schon Abweichungen im Mikrosekundenbereich machen sich beim Verzögern klanglich bemerkbar. Abbildung 9-9 verdeutlicht die Vorgehensweise.

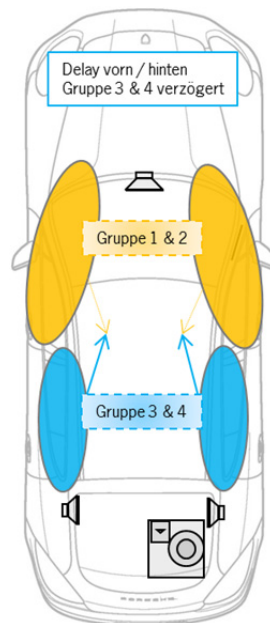


Abb. 9-9: Visualisierung der Lautsprechergruppen und Delaystrukturen. Eigene Darstellung

Ausgehend von den Verzögerungswerten der zuvor genannten Methodik (die Schallwellen der hinteren Kanäle zum selben Zeitpunkt am Hörplatz vorn eintreffen zu lassen wie die vorderen, siehe Abb. 9-8) wurden nun die hinteren Gruppen in der zeitlichen Zuordnung zu den vorderen verschoben. Das in Abb. 9-8 eingestellte Delay dient in den folgenden Betrachtungen als neuer Nullpunkt. Hilfestellung beim Verständnis der Vorgehensweise soll dabei folgende Formel geben ($\Delta t = \text{Delay}$):

$$\Delta t_{\text{Gruppe hinten}} = \Delta t_{\text{auf Nullpunkt}} \pm \Delta t_{\text{varianz hinten}}$$

Das Delay der Gruppen 3 und 4 wurde symmetrisch verändert. Werte kleiner als $\Delta t_{\text{auf Nullpunkt}}$ führen dazu, dass die Fondlautsprecher aufgrund des Präzedenz-Effekts zunehmend als Schallquelle hörbar werden. Das Abbild der virtuellen Bühne wird in Richtung Fahrzeugmitte gezogen, die Mittel- und Hochtonlautsprecher hinten werden als störend vordergründig empfunden. Die unter anderen von Wittek und Theile beschriebenen Kammfiltereffekte bei zu großer zeitlicher Differenz zweier korrelierender Signale sind unter Verwendung eines rosa Rauschens eindeutig feststellbar. Im konkreten Fall wurden bereits ab 0,5ms zusätzlicher Verzögerung (1,8ms Delay insgesamt) spektrale Verzerrungen in der Musikwiedergabe hörbar. Durch Versuche fand sich bei einer zusätzlichen Verzögerung zwischen 0,1ms (1,4ms insgesamt) und 0,4ms (1,7ms insgesamt) gegenüber der GLZ-optimierten Werte zu den vorderen Lautsprechern ein Bereich, in dem sich die Räumlichkeit und Präzision der Wiedergabe steuern lässt. Ein Delay-Wert größer $\Delta t_{\text{auf Nullpunkt}}$ führt je nach Ausprägung zu einem sehr fokussierten, schmalen Bühnenbild bei höheren Werten und zu einem breiteren, unschärferen bei kleineren. Mit zunehmendem Delay nimmt, bedingt durch die Phasenverschiebung, der Tieftonkanäle vorne und hinten der Schalldruck im Tieftonbereich ab. Die Amplitudenverläufe unterschiedlicher Verzögerungszeiten im Tieftonkanal sind in Abbildung 9-11 zu erkennen.

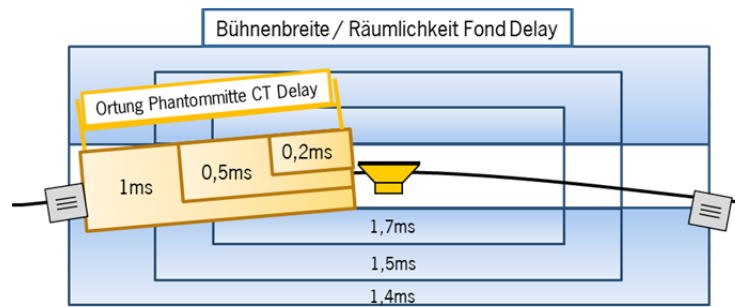


Abb. 9-90: Visualisierung der Wahrnehmung unterschiedlicher Delayzeiten des CT (gelb) und der Fondlautsprecher (blau), Hörposition Fahrerseite vorne. Größe der Rechtecke gibt Lokalisierungsschärfe(gelb) / Breite(blau) vor. Eigene Darstellung.

Ist die Laufzeit des Centerlautsprechers auf die Mitteltonlautsprecher vorne korrigiert, ist dieser zwar kaum als solcher wahrnehmbar, jedoch ist die Wiedergabe außenlastig. Gleichzeitig liegt die Phantommitte direkt vor dem Hörplatz (z.B. in der Mitte des Cockpit). Nutzt man den Präzedenz-Effekt, lässt sich die außenlastige Bühnendarstellung verringern. Durch ein wesentlich kürzeres Delay als das in den Mitteltonkanälen eingesetzte, wandert die Ortung der Phantommitte der vorderen Lautsprecher in Richtung Fahrzeugmitte. Der festgestellte verwendbare Wertebereich lag zwischen 0,2ms und 0,6ms. Bei 0ms Delay wurde beobachtet, dass die Bühne sich in die Breite und in Richtung Fond bewegt. Interessanterweise wurde die Phantommitte von 0,6ms bis 0,2ms zunehmend lokalisierbarer, um dann plötzlich bis 0ms auseinander zu brechen. Bei 0,2ms gelang eine präzisere Wiedergabe, jedoch trat der MT hinten hervor. Ab 0,6ms driftet die Phantommitte nach außen und die Ortung liegt bei den Türlautsprechern. Der Centerkanal kann auch als „Scharfsteller“ der Phantommitte bezeichnet werden. Als optimaler Kompromiss zwischen Hörbarkeit der hinteren Lautsprecher, akzeptabler Räumlichkeit sowie angemessener Lokalisationsschärfe wurde ein Wert von 0,25ms (bei einem Delay von 3,23ms im MT) ermittelt. Siehe hierzu auch Abbildung 9-10. Je nach eingestelltem Delay kann der CT-Kanal um -1dB in seinem Ausgangspegel reduziert werden. Dies ist hinsichtlich der in Abschnitt 8.1 erwähnten frühen Leistungsgrenze des CT-Kanals eine lohnenswerte Maßnahme.

Im Tieftonbereich wurden mehrere Vergleichsmessungen zwecks optimaler Überlagerung der vorderen und hinteren Lautsprecher durchgeführt. Wie bei den Messungen vom Fahrerplatz aus waren der Tieftonkanal vorne links und hinten links aktiv.

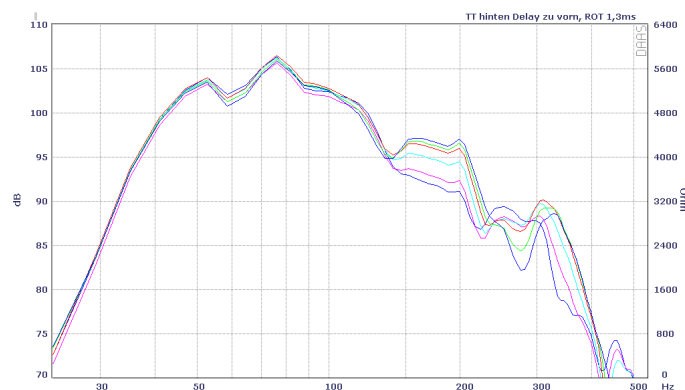


Abb. 9-10: Vergleich des Amplitudenverlaufs der TT vl und hl zu unterschiedlichen Delayzeiten 0,7ms blau (obere bei 150Hz), 1ms gr, 1,3ms rot, 1,6ms cyan, 1,9ms mag, 2,2ms blau untere. Eigene Darstellung

In Abbildung 9-11 werden die Unterschiede besonders ab 140 Hz deutlich. Hier ergibt ein Delta von 1,5ms im Delay im Amplitudenverlauf eine Differenz von bis zu 6dB. Der rote Amplitudenverlauf mit 1,3ms Delay deckt sich mit der durch die Sprungantwort optimalen ermittelten Verzögerungszeit des TT hinten zu vorn (Abbildung 10-4). Dieser bringt in der Summe den größten Pegelzuwachs, sorgt aber in Kombination mit den restlichen Lautsprechern der Gruppe, wie zuvor bereits beschrieben, für ein engeres Bühnenbild. Jedoch führt eine Abweichung von gerade mal 0,1ms zu einer Öffnung der Bühne. Gleichzeitig bewegt sich der Amplitudenverlauf der TT bei einem Delay von 1,4ms weiterhin in der Nähe des Verlaufs bei 1,3ms (rot). Außerdem stellt sich bei einer Verzögerung der hinteren Lautsprecher der angenehme Effekt ein, dass die hinteren Mittel- und Hochtonlautsprecher, bedingt durch die Nähe zum äußeren Ohr, nicht mehr unmittelbar wahrgenommen werden, was im Vorfeld als negative Eigenschaft des Systems bekannt war. Die Integration gelingt besser und die Lautsprecher sorgen während der Wiedergabe für weniger Irritation. Auf den Fondsitzplätzen führt die Verzögerung nach vorn zu einer Verschiebung in der Ortung der Schallquellen. Wurden diese zuvor in den Türen lokalisiert, befinden sie sich je nach eingestelltem Delay nun hinter den Sitzen der vorderen Plätze. Außerdem bewegt sich, je länger das eingestellte Delay ist, die Bühne in Richtung Windschutzscheibe. Bei langen Delayzeiten von 4ms oder mehr rutscht die gesamte Bühne unter die Windschutzscheibe. Auf den vorderen Plätzen stellt sich hingegen ein Effekt der Umhüllung ein. Durch die Surroundlautsprecher lässt sich die Räumlichkeit der Wiedergabe künstlich erhöhen. In Hörversuchen wurden Werte um 11ms im Fond als angenehme Erweiterung des Raumes wahrgenommen. Somit lässt sich die durch den baulichen Versatz der Chassis entstehende künstliche Räumlichkeit bei korrigierten Laufzeiten mittels der Surrounds näherungsweise wiederherstellen. Durch eine zeitliche Anpassung des Subwoofers auf die vorderen Tieftonlautsprecher konnte in Summe kaum ein Schalldruckpegel-Zuwachs ausgemacht werden. Wie man anhand der Sprungantwort in Abbildung 9-12 sehen kann, spielen ohne Verzögerung Subwoofer und Tieftöner, bei Invertierung der Tieftonlautsprecher, bereits in passender Phase.

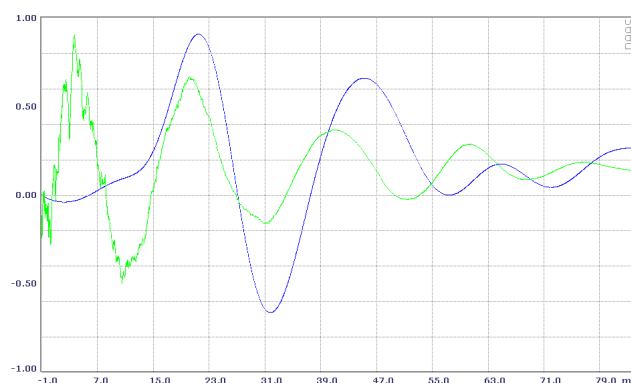


Abb. 9-112: Ohne Verzögerung auf den Subwoofer: Sprungantworten des Soundsystems ohne Subwoofer (grün) und des Subwoofers (blau). Eigene Darstellung

Erneut in Phase spielen sie wieder bei rund 18ms Verzögerung. Die Summenfrequenzgänge weisen nur geringfügige Abweichungen von unter 1dB auf. Nachdem zu Beginn angenommen wurde, dass ein Delay auf den Subwoofer hin keine klanglichen Vorteile mit sich bringt, wurde bei erneuten Hörversuchen mit anderem Musikmaterial das Gegenteil festgestellt. Die Wiedergabe ohne Zeitkorrektur generiert einen

etwas „breiteren“ Basseindruck und hierdurch einen erhöhten Räumlichkeitseindruck in der Bühnendarstellung. Mit Zeitkorrektur gewinnt die Wiedergabe an Durchsichtigkeit und Präzision, was in Hörversuchen als vorteilhafter empfunden wurde. Eine zeitrichtige Verzögerung der Kanäle auf den Subwoofer sollte daher bei dem Erstellen einer Delaystruktur in Betracht gezogen werden.

Klanglich nicht sinnvoll ist die Methode, alle Lautsprecher einzeln zeitrichtig auf die Fahrerposition einzustellen. Eine Beibehaltung der GLZ hinten, um diese dann gebündelt auf die Front zu verzögern, wobei der TT vl als Referenzpunkt gilt, ist klanglich von Vorteil. Über Bruchteile einer Millisekunde lässt sich das Klangbild beeinflussen, die Möglichkeiten der klanglichen Variation sind hier vielschichtig. Die zeitlichen Bereiche, in denen man sich dabei idealerweise bewegt, wurden erkannt und aufgezeigt.

9.3.2 Optimierung links/rechts spezifisch

Weiterhin wurden die Auswirkungen von einem einseitigen Delay im Fahrzeug untersucht. Da der Zuhörer im Falle der Fahrposition den linken Lautsprechern näher zugewandt ist als den rechten, entsteht eine asymmetrische Bühnendarstellung. Die Wiedergabe des Systems klingt linkslastig für den Fahrer und rechtslastig für den Beifahrer. Die Phantommitte zwischen der linken und rechten Lautsprechergruppe wird mit Unterstützung des Center-Lautsprechers versucht, in der Fahrzeugmitte zu positionieren, was allerdings auch unter den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Delay-Maßnahmen nicht ausreichend gelingt. Für die Hörversuche wurde eine Verzögerung der gesamten Lautsprecher der linken Seite gegenüber denen der rechten eingestellt. Dabei wurden die in 10.2 ermittelten Laufzeitkorrekturen beibehalten. Die Delay-Zeiten wurden ausschließlich durch Hörversuche ermittelt. Als Quellmaterial diente dabei Musik verschiedener Stilrichtungen, Sprache (Mono) sowie rosa Rauschen. Wobei sich die Korrektur der Laufzeit bei E-Musik weniger bemerkbar macht als bei U-Musik oder Sprache. Als empfehlenswerte Bewertungsmittel der stereofonen Abbildung wären hier die Aufnahmen der „Big Phat Band“ zu nennen, welche vor allem durch ihre über Pegeldifferenzen räumlich klar getrennten und in der Tiefenstaffelung hervorragend positionierten Bläsersektionen auffallen. Für die Positionierung der Phantommitte nutzbar ist „Spanish Harlem“ von „Rebecca Pidgeon“, welche auch eine unproblematische Bewertung der resultierenden Klangverfärbungen zulässt.

Durch die einseitige Verzögerung der links gelegenen Lautsprecher verschiebt sich die Phantommitte nach Wittek und Theile um 13% pro 0,1ms Delay.¹⁰³ Die linken Lautsprechergruppen wurden in kleinen Schritten von 0,01ms verzögert. Bei 0,146ms Delay, was mit 5cm deutlich unter der Wegdifferenz zwischen linker und rechter Seite zur Hörposition liegt, stellt sich der angenehme Effekt ein, dass die Phantommitte sich über den Center-Lautsprecher ausbreitet. Dabei bleibt sie unscharf, positioniert sich aber in der Fahrzeugmitte. Bei größeren Werten wird die Phantommitte präziser abgebildet, es stellen sich aber deutliche Klangverfärbungen ein und die Räumlichkeit nimmt ab. Auch bei 0,146ms klingt die Bühne kompakter und enger, jedoch zugunsten der Lokalisierbarkeit der

¹⁰³ siehe Abschnitt 4.3 „Räumliche Darstellung“

Phantomschallquellen. Bei 1,635ms (56,2cm) Delay, was in etwa der tatsächlichen Wegdifferenz entspricht, stellt sich der Effekt der Umhüllung stark ein und das gesamte Bühnenbild rutscht dicht an die Windschutzscheibe. Die Wiedergabe gewinnt nochmals an Lokalisationsschärfe und das stereofone Abbild der musikalischen Inszenierung ähnelt stark dem Original.¹⁰⁴ Außerdem war auffällig, dass die Variante mit 0,146ms Delay auch ein akzeptables Klangbild für den Beifahrer liefert, während durch die hohe Verzögerung von 1,635ms die Bühne für diesen kollabiert und somit nur für einen Hörplatz im Fahrzeug nutzbar ist. Andererseits war bei dem kurzen Delay von 0,146ms auffällig, dass der Mitteltonlautsprecher etwas zu vordergründig spielte. Abhilfe schaffte hier eine Gainreduzierung der gesamten linken Fahrzeugseite um 1dB. Mehr als 1dB wurden dabei als negativ empfunden. Die Lautstärkebalance wurde so leicht korrigiert und im Panorama 100%ig links angeordnete Instrumente verloren an Dominanz. Im Fond stellte sich ein ähnlicher Effekt wie bei der vorne / hinten Verzögerung ein. Die Bühne rutschte nach vorne. Die sonstige Empfindung ähnelte der Wahrnehmung vorn.

Die Verzögerung der linken Lautsprecherseite resultiert in einer homogenen, stereofonen Wiedergabe für den Fahrer. Auf dem Beifahrerplatz führt dies zu deutlichen klanglichen Einbußen. Auch in zukünftigen Fahrzeuggenerationen ist bei Porsche keine hörplatzoptimierte Klangeinstellung vorgesehen, daher ist diese Variante einer Delaystruktur hier nicht anwendbar.

9.3.3 Hörversuche

Durch Hörversuche sollte festgestellt werden, inwieweit Delaystrukturen im Porsche Panamera auf Akzeptanz stoßen würden. Es wurden zwei verschiedene Delaystrukturen erstellt und als Preset gespeichert. Für eine klare Differenzierung wiesen beide einen deutlichen Eigenklangcharakter auf. Um die Intersubjektivität zu wahren, wurden keine Qualitätsparameter zur Bewertung der Presets vorgegeben. Es wurde befürchtet, dass bei der Vorgabe von Bewertungskriterien die Probanden emotionale Eindrücke mit eingeschränkter Subjektivität schildern würden und die Wahrnehmung des Gesamteindrucks, wie ihn auch die Kunden erleben, beeinflusst würde. Dem jeweiligen Proband wurden drei Presets mit drei unterschiedlichen Musiktiteln und einer Sprachaufnahme zur Verfügung gestellt. Im Audio Architect wurde ein sogenanntes „Custom-Panel“ erstellt, in dem drei Schaltflächen mit der Bezeichnung A, B und C angelegt wurden. Diese waren mit den jeweiligen Presets verknüpft. Über den Touchscreen des Laptops ließ sich so nahtlos zwischen den Presets wechseln.

Preset A:

Die Gruppen 1, 2, 3 und 4 blieben in sich, mit den in Abschnitt 9.2 ermittelten Verzögerungswerten, zeitrichtig. Die Gruppen 3 und 4 wurden um 1,469ms gegenüber den Gruppen 1 und 2 verzögert. Der Center wurde um 0,354ms verzögert und erreicht damit vor dem Mittel- und Hochtöner den Zuhörer. Die Phantommitte liegt hier in der Mitte des Armaturenbrettes.

¹⁰⁴ nach Vergleichshören auf einer Burmester Stereo Anlage

Preset B:

Von der Struktur her wie Preset A, nur wurde hier der Delaywert der vorderen MT und HT gegenüber der vorderen TT um 0,2ms erhöht. Der Center wurde gegenüber Preset A zeitrichtig auf die vorderen Gruppen verzögert. Die Phantommitte liegt hier mittig direkt vor dem Hörplatz.

Preset C:

Preset C entspricht der Bumerster- Klangadaption und enthält keinerlei Delaystruktur.

Schon während dem Erstellen der ersten Delaystrukturen fiel auf, dass die Bewertung der Qualität der Laufzeitkorrekturen stark musikabhängig ist. So wurde deutlich, dass flächige und räumliche Musikproduktionen in der Einstellung ohne Delaystruktur klanglich im Vorteil waren gegenüber den Presets mit Laufzeitkorrektur. Als Titel wurden "Nils Landgren & Joe Sample - Get out of my life woman", "Gordon Goodwin's Big Phat Band - Count Bubba's Revenge" und "Papa Was a Rolling Stone" verwendet. Bei der Sprachaufnahme handelte es sich um eine Monolog-Aufnahme eines Studiosprechers. An der Bewertung nahmen sechs Personen teil. Alle Probanden stammten aus der Audio & Akustik Abteilung bei Porsche und sind somit Audioexperten. Es gab zwei Beurteilungsbögen, einen für Hörversuche vorn und einen für hinten, in dem die Probanden jeweils ihr favorisiertes Preset zu den entsprechenden Musiken ankreuzen mussten. In einem weiteren Feld sollten Notizen zu den Klangempfindungen gemacht werden.

Vorne	Titel 1 Papa Was a Rolling Stone	Titel 2 Big Phat Band	Titel 3 Nils Landgren & Joe Sample	Sprache Lexicon Audiotest
Preset A - Frontstaging 15	5	4	4	2
Preset B – Optimierte & breit 7	1	1	1	4
Preset C – Bumerster 2	0	1	1	0
Hinten				
Preset A - Frontstaging 10	2	1	2	5
Preset B – Optimierte & breit 8	3	3	2	0
Preset C – Bumerster 6	1	2	2	1

Tabelle 9-3: Häufigkeiten der Favorisierten Presets. Eigene Darstellung

Wie aus Tabelle 9-2 hervorgeht, wurde mit 25 Stimmen in Summe am häufigsten Preset A gewählt. Gefolgt von Preset B mit 15 und Preset C mit 8 Stimmen. Im Folgenden wurde aus den Stichworten der freien Bewertung der Presets eine Quintessenz gezogen und in kurzen Sätzen vereint. Da teilweise die Meinungen und Empfindungen gegensätzlich ausfielen, sind auch vereinzelt Gegensätzlichkeiten innerhalb der zusammengefassten Sätze zu finden.

Meinungen zu Preset A

Vorne:

„Erhöhte Durchsichtigkeit bei straffer Basswiedergabe.“

„Ausgewogenes stereofones Klangbild mit Schwächen in der Präsenz.“

Hinten:

„Erhöhte Lokalisationsschärfe bei geringerer Emotionalisierung.“

„Nearsidelastige, zur Front verschobene Wiedergabe.“

Sprache:

„Natürliche, wenn auch verschwommene Wiedergabe.“

Meinungen zu Preset B

Vorne:

„Leicht Nearsidelastige, wenn auch direkte und umhüllende Wiedergabe.“

„Dynamisches, konzentriertes Klangbild mit leichter Grundtonverfärbung und Defiziten zur Fahrzeugmitte hin.“

Hinten:

„Tonal ausgewogen und homogen in der Wiedergabe, jedoch mit eingeengtem Klangbild.“

„Stabiles, souveränes und umhüllendes Bühnenabbild.“

„Sauberstes Bühnenabbild.“

Sprache:

„Präzise und fokussierte, vor dem Zuhörer stehende Phantommitte.“

Meinungen zu Preset C

Vorne:

„Nearsidelastige, tonal unausgewogene Wiedergabe über eine breite Bühne“.

„Geringerer Impact bei erhöhter Ortbarkeit der einzelnen Schallentstehungsorte.“

„Unausgewogenes, aber sauberes Bühnenpanorama.“

Hinten:

„Sehr räumliche, wenn auch außenlastige Wiedergabe mit Umhüllungseffekt.“

„Angenehmes Langzeithören.“

„Packende, klangfarbenstarke Wiedergabe, die weniger frontlastig gelingt, jedoch mit Defiziten zur Fahrzeugmitte.“

Sprache:

„Undeutliche, verschwommene nearsidelastige Wiedergabe.“

Der Hörversuch sollte die klanglichen Auswirkungen und Möglichkeiten aufzeigen, welche Delaystrukturen bieten, und eine potentielle Bestätigung für den Einsatz einer Delaystruktur in künftigen Fahrzeuggenerationen erbringen.

Aus den Urteilen der Probanden geht hervor, dass jedes Preset seine spezifischen Stärken aufweist. Das auf dem Burmester-System basierende Preset erhielt den geringsten Anteil an Stimmen. Der Hörversuch zeigt auf, dass es auch unter der Verwendung von Delaystrukturen möglich ist, eine Porsche-spezifische Soundvorstellung umzusetzen.

10 Fazit und Ausblick

Durch die Bearbeitung der Themen konnten Optimierungsansätze bezüglich der Klangeigenschaften eines High-End Soundsystems beschrieben und präsentiert werden. Bevor die eigentlich gestellten Ziele bearbeitet werden konnten, war es notwendig, die externe Audio-Technik zu integrieren. Während die hardware- und softwareseitige Installation mit dem anschließenden Übertragen des Audioflows aus dem Burmester-System auf den BSS-Controller weitestgehend problemlos verlief, erwies sich die Klangadaption des Burmester High-End Soundsystem im Porsche Panamera als schwierig. Die Anwendung Audio-Architect, welche sich noch im Entwicklungsstadium befindet, bietet noch keinen vollen Funktionsumfang und erschwerte an manchen Stellen die Bearbeitung der Themen. Durch zahlreiche zusätzliche akustische Messungen konnte das System mittels zusätzlicher Equalizer-Punkte und Invertierungen in den Einzelkanälen weitestgehend angepasst werden. Die anschließende Betrachtung der vorgegebenen Kompressor- und die unbekannten Limiter-Parameter machten ein Vermessen der einzelnen Kanäle bezüglich des Verhaltens ihrer Dynamikprozessoren notwendig. Dem Wunsch der Porsche Abteilung für Audio & Akustik, das erste Thema Kompressor- und Limiter-Parameter detailliert zu betrachten und Unklarheiten aufzuarbeiten, wurde nachgegangen. Einerseits konnten hierdurch zahlreiche Erkenntnisse als auch Bestätigungen und Expertisen gewonnenen werden, andererseits führte dies auch zu einer Verzögerung des zweiten Themenblocks „Delaystrukturen“. Die festgestellten klangbeeinflussenden, hörbaren Regelvorgänge, Artefakte und Klirr der Dynamikprozessoren lassen sich durch genannte Methoden wie eine anteilige Kopplung der Gain-Reduction und von der Gain-Reduction unabhängige Regelzeiten der Kompressoren, im Vergleich zu den vorherigen verwendeten Parametern, reduzieren. Dabei war für den Autor eine maßgebliche Erkenntnis, wie vielschichtig und unterschiedlich verschiedene Kompressoren in ihrem Regelverhalten arbeiten und wirken. Es wurde messtechnisch festgestellt, dass die in den Limitern gesetzten Schwellwerte optimal gesetzt sind, gleichzeitig aber auch, dass die Automotive-Endstufen Potential für Optimierungen aufweisen: Durch Hörversuche bei hohen Lautstärken lässt sich unmittelbar feststellen, dass die gesteigerte Leistung und der stets hohe Dämpfungsfaktor der externen PA-Endstufen das Soundsystem im Panamera souveräner und sauberer, also mit geringeren Klirr sowie erhöhter Durchsichtigkeit spielen lassen. Festgestellte Tieftönverzerrungen zu hohen Lautstärken hin erwiesen sich im Gesamtkontext des Systems als vorteilhaft. Sie suggerieren Lautstärke und nehmen dem System im Grenzbereich durch ihr Hervortreten die Schärfe und gestalten dadurch das Zuhören angenehmer. Es wurden Varianten entwickelt, die Verzerrungen auch im BSS-System abzubilden, was auch gelang, woraus sich letztendlich aber keine Optimierung hinsichtlich zukünftiger Generationen ableiten lässt. Die erarbeiteten Optimierungsansätze der Kompressor-/Limiter-Parameter wurden im Rahmen dieser Arbeit -neben Porsche selbst- auch dem Soundsystem-Zulieferer präsentiert und an ihrer Umsetzbarkeit wird diskutiert.

Die verkürzte Bearbeitungszeit des Themenblocks der Delaystrukturen ließ bei diesem eine effiziente, wenn auch nicht so umfangreiche Betrachtung zu, wie es bei den Dynamikprozessoren der Fall war. Es wurden signifikante Methoden und Möglichkeiten von Delaystrukturen aufgezeigt. Die klanglichen Auswirkungen der Editierung verschiedener Parameter waren hier deutlich eindrücklicher und greifbarer als im Themenblock „Dynamikprozessoren“. Es wurden verschiedene Methoden in der Erstellung von Delaystrukturen und deren Auswirkungen beschrieben. Dabei stellte es sich als sinnvoll heraus, das Soundsystem in Lautsprechergruppen zu unterteilen und innerhalb dieser Gruppen eine Zeitrichtigkeit herzustellen, um die Gruppen anschließend zueinander in ihrer Laufzeit anzupassen. Es wurde beschrieben, dass es sich klanglich als vorteilhaft erwies, die Mittel- und Hochtöner auf das Amplitudenmaximum der Sprungantwort des Tieftonlautsprechers zu verzögern. Eine Verzögerung der hinteren Lautsprecher auf die vorderen -mit dem Center-Lautsprecher als „Stellschraube“- lassen viele Varianten von Bühnendarstellungen zu. Es wurden Zeitbereiche, in denen man sich bewegen sollte, ermittelt und Empfehlungen ausgesprochen. Die Verzögerung der linksseitigen Lautsprecher bringt die Möglichkeit mit sich, eine Fahrerplatz-optimierte Umgebung zu schaffen. Dies ist jedoch für andere Hörplätze im Fahrzeug nicht erstrebenswert. Anschließende Hörversuche mit verschiedenen Delaystrukturen und mehreren Probanden belegten die Sinnhaftigkeit von Delaystrukturen als klangverbesserndes Instrument in zukünftigen Fahrzeuggenerationen. Auffällig war, wie sehr unterschiedliche Musikstile die Wertung von Delaystrukturen beeinflussen.

Es wurde eine Anleitung und Einführung in die externe Audiotechnik gegeben. Sie bildet die Grundlage und Möglichkeiten für weitere Untersuchungen. So lassen sich zum Beispiel schnell alternative Lautsprecher einbinden und durch vergleichshören im Fahrzeug bewerten. Auch weitere Untersuchungen hinsichtlich FIR-Filter (in der aktuellen Audio Architect Version 1.40 als Modul noch nicht verfügbar) bzw. Frequenzweichen-Design sind denkbar und einfach umsetzbar. Abschließend wurden drei zusammenfassende Anleitungen verfasst, welche die zukünftige Bearbeitung der Themen übersichtlich und einfach gestalten sollen. Sie finden sich auf der CD im Anhang unter den Bezeichnungen „Guideline BSS-System - Inbetriebnahme des Audio-Architect.pdf“, „Guideline - Dynamikprozessoren Parameterermittlung und Optimierung.pdf“ und „Guideline – Delaystrukturen.pdf“.

Literaturverzeichnis

- AUDACITY (2014): Manual, Online im Internet: <http://audacity.sourceforge.net/help/audacity-manual-1.2.pdf> [Zugegriffen am 13.08.2014]
- BLAUERT, JENS (2008): Räumliches Hören, in: Dickreiter, Michael / Dittel, Volker / Hoeg Wolfgang / Wöhr, Martin (Hrsg.): Handbuch der Tonstudioteknik, Berlin: Walter de Gruyter
- BSS AUDIO (2003): Neville Thiele Method™ Crossover Filters, Online im Internet: http://adn.harmanpro.com/site_elements/resources/131_1363638412/NTMFilters_original.pdf [Zugegriffen am 29.07.2014]
- CHARY, RAMDAS V. (2008): SHARC 2146x Processor Overview, Analog Devices, Online im Internet: http://www.analog.com/static/imported-files/online_training/SHARC_2146x_Slides.pdf [Zugegriffen am 29.07.2014]
- CRAWFORD, JOHN (2007): High-End Hörerlebnis im Auto, in: Automobil & Elektronik (Ausgabe 5, Oktober 2007), Heidelberg: Hüthig
- CURDT, OLIVER (2011): Digitale Filter, Online im Internet: http://www.hdm-stuttgart.de/~curdt/Digitale_Filter.pdf [Zugegriffen am 29.07.2014]
- DBX WHITE PAPER (1998): AutoVelocity™ Dynamics and the dbx 160SL, Online im Internet: http://rdn.harmanpro.com/product_documents/documents/725_1324409665/160SWP_original.pdf [Zugegriffen am 29.07.2014]
- DELLSPERGER, FRITZ (2004): Passive Filter, FH Bern, Online im Internet: <http://www.fritz.dellsperger.net/Downloads/Filter.pdf> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- DICKREITER, MICHAEL (1987): Handbuch der Tonstudioteknik, München: K.G. Saur Verlag
- ECKARDT, STEFFI (2013): MOST in 150 Fahrzeugmodellen, Online im Internet: <http://www.elektroniknet.de/automotive/bussysteme/artikel/102101/> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- GOERTZ, ANSELM (2008): Lautsprecher, in: Weinzierl, Stefan (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Berlin-Heidelberg: Springer
- GOERTZ, ANSELM / WOLFF, MARKUS (2002): Neue Methoden zur Anpassung von Studiomonitoren an die Raumakustik mit Hilfe digitaler Filterkonzepte (Teil 1), Online im Internet: <http://www.ifaa-akustik.de/files/DAGA2002-Teil1.PDF> [Zugegriffen am 31.07.2014]
- GÖRNE, THOMAS (2011): Tontechnik, München: Hanser
- GRZEMBA, ANDREAS (2007): Netzwerkarchitekturen in automobilen Applikationen, in: Grzemba, Andreas (Hrsg.): MOST, das Multimedia-Bussystem für den Einsatz im Automobil, Pöng: Franzis
- HELLMUTH, OLIVER (2013): Wenn die Bässe oben und unten wummern, in: Weißenborn, Stefan: Welt.de vom 30.05.2013, Online im Internet: <http://www.welt.de/motor/article116651637/Wenn-die-Baesse-oben-und-unten-wummern.html> [Zugegriffen am 29.07.2014]

- HOEG, WOLFGANG (2008): Methoden zur subjektiven Beurteilung der Audioqualität, in: Dickreiter, Michael / Dittel, Volker / Hoeg Wolfgang / Wöhr, Martin (Hrsg.): Handbuch der Tonstudioteknik, Berlin: Walter de Gruyter
- JESCHKE, LENNART (2009): Mastering: Kompressoren richtig einsetzen, in: Recording Magazin (Ausgabe 3, 2009), Bergkirchen: PPVMEDIEN
- JOHNSEN, ROGER (1998): Detection and the Dynamics Duo, dbx 1998, Online im Internet: <ftp://ftp.dbxpro.com/pub/pdfs/WhitePapers/DetectionandDynamicsDuo.pdf> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- JÜNGLING, GERD (2014): Die Einstellung der Rücklaufzeit von Kompressoren und Begrenzern, Pro Audio White Papers, Online im Internet: http://www.adt-audio.de/ProAudio/WhitePapers/Releasezeit_Einstellung_3.html [Zugegriffen am 29.07.2014]
- KORNEXL, GEORG (2012): Digitale Emulationen von analogen Kompressoren im Vergleich, Diplomarbeit: Universität Wien
- MAIER, PETER (2008): Studioakustik, in: Weinzierl, Stefan (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Berlin-Heidelberg: Springer
- MASCHKE, CHRISTIAN / JAKOB, ANDRÉ (2010): Psychoakustische Messtechnik, in: Möser, Michael (Hrsg.): Messtechnik der Akustik, Berlin Heidelberg: Springer
- MEROTH, ANSGAR (2008): Digitale Audioelektronik, in: Meroth, Ansgar / Tolg, Boris: Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug, Wiesbaden: Vieweg
- MOST COOPERATION (2014): Daimler Introduces MOST150 in the New Mercedes-Benz S-Class, Online im Internet: <http://www.mostcooperation.com/en/news-and-events/press-releases/pressreleases/download/daimler-introduces-most150-in-the-new-mercedes-benz-s-class/pr/786/> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- NEUSCHWANDER, HANS W. (2010): Digitale Filter, Grundlagen und Programmierung, Online im Internet: http://www.fh-kl.de/~hans.neuschwander/download_skripte/digfil/DigFilter.pdf [Zugegriffen am 29.07.2014]
- NOSELLI, GUIDO (2001): Concise parameters for assessing a pro audio system for sound reinforcement use, Online im Internet: http://www.outline.it/articles_eng/OUT_Art_Watts_3.pdf [Zugegriffen am 30.07.2014]
- NUBERT, GÜNTHER (2013): Informationen für wirklich »Technik-Interessierte«, Online im Internet: http://www.nubert.de/downloads/ts_technik-interessierte.pdf [Zugegriffen am 29.07.2014]
- PFLIEDERER PETER M. (1990): HiFi auf den Punkt gebracht, München: Pflaum
- PORSCHE (2009): Porsche G1 Target Specification Project Reference: internes Dokument Porsche_G1_Pflichtenheft_2.00.pdf
- REUTER, CHRISTOPH (1995): Der Einschwingvorgang nichtperkussiver Musikinstrumente, Auswertung physikalischer und psychoakustischer Messungen, in: Europäische Hochschulschriften, Reihe XXVI Musikwissenschaft, Bd. 148, Frankfurt am Main: Peter Lang Verlag
- SCHICKEDANZ, STEFAN (2007): Zarte Schalmeienklänge bei Tempo 300, in: Sportauto (Ausgabe 11, 2007) und Online im Internet: <http://www.sportauto.de/testbericht/hifi-systeme-von-audi-r8-und-bmw-m5-im-vergleich-1375645.html> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- SEIFFERT, ULRICH (2011): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Braess, Hans-Hermann / Seiffert, Ulrich (Hrsg.), Wiesbaden: Springer

- SENGPIEL, EBERHARDT (2008): Fragen zur Wirkung der Obertöne, Online im Internet:
www.sengpielaudio.com/ZurWirkungDerObertoene.pdf [Zugegriffen am 30.07.2014]
- SENGPIEL, EBERHARDT (2012): Filter mit 6dB pro Oktave unter der Lupe, Online im Internet:
<http://www.sengpielaudio.com/FilterMit6dBproOktave.pdf> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- SENGPIEL, EBERHARDT (2014): Rechner Abstandsgesetz, Online im Internet:
<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-abstandsgesetz.htm> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- STMICROELECTRONICS (2008): ST Datasheet TDA7575B, Online im Internet
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00175174.pdf>
[Zugegriffen am 30.07.2014]
- STRASSACKER, PETER (2007): Frequenzweichenentwicklung und Raumklang, Online im Internet:
http://www.referenzboxen.de/index_hifi_de.htm?http://www.referenzboxen.de/hifi/inter_ps_raumklang.htm [Zugegriffen am 29.07.2014]
- THEILE, GÜNTHER (2001): Multichannel Natural Music Recording Based On Psychoacoustic Principles, AES-Preprint 5156, Extended Version 3
- TENBUSCH, W.J. (1989): Grundlagen der Lautsprecher, Duisburg: Michael E. Brieden Verlag
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN (2010a): FIR-Filter, Online im Internet:
<https://ti.tuwien.ac.at/cps/teaching/courses/dspv/files/FIRFilter.pdf> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN (2010b): IIR-Filter, Online im Internet:
<https://ti.tuwien.ac.at/cps/teaching/courses/dspv/files/IIRFilter.pdf> [Zugegriffen am 29.07.2014]
- ULTEÉ AUDIOTECHNIK (2004): Benutzerhandbuch DAAS4usb, Enigma-Systems, van den Hul
- TIMMERMANN (2011): Frequenzgänge verstehen, in: Hobby Hifi (Ausgabe 3, 2011), Kleve: Timmermanns
- WEBERS, JOHANNES (2007): Handbuch der Tonstudientechnik für Film, Funk und Fernsehen, Poing: Franzis
- WEINZIERL, STEFAN (2008): Handbuch der Audiotechnik, Berlin-Heidelberg: Springer
- ZELLER, PETER (2009): Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch, Wiesbaden: Vieweg+Teubner
- ZWICKER, EBERHARD / FASTL, HUGO (1999): Psychoacoustics, Heidelberg: Springer

Anhang

CD-Inhalt

Ordner Audio Architect Projektdateien:

- Audioflow Basis Setup ohne Parameter.audioarchitect
- G1 Klangadaption und Delaypresets.audioarchitect
- G1 TT Verzerrung.audioarchitect

Ordner Messsignale:

- 1K10StepBisMinus60.wav
- 1KMinus10.wav
- 40Hz10StepBisMinus60PiT.wav
- 40Minus10.wav
- 100Hz10StepBisMinus60.wav
- 100Minus10.wav
- 125Burst.wav
- Pinknoise.wav

Ausgangsspannung Burmester Verstärker pro Click.xlsx

Bachelorarbeit – Hannemann, Ajan-Alexander, SS2014.pdf

G1 Parameter.pdf

Guideline - Delaystrukturen.pptx

Guideline - Dynmikprozessoren Parameterermittlung und Optimierung.pptx

Guideline BSS-System - Inbetriebnahme des Audio-Architect.pptx

Limiter Berechnungen.xlsx

PA Rack - Verkabelung und Einbindung.pdf

PA-Rack - Signalfluss.pdf

Pegelflow BSS-System.pdf