

Diplomarbeit

**Akustisch-klangliche Optimierung digitaler
Audio-Kompandersysteme für
drahtlose Mikrofonanlagen**

von
Daniel Schleef

Erich-Thienhaus-Institut der Hochschule für Musik Detmold
in Kooperation mit
Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, Wedemark

Betreuung HfM Detmold: Prof. Thomas Görne (Erstgutachter)
Betreuung Fa. Sennheiser: Prof. Dr. Jürgen Peissig

Zeitraum: April - Juli 2004

hochschule *für musik*  detmold

 **SENNHEISER**

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden unterschiedliche digitale Kompandersysteme untersucht, die im Bereich der Drahtlosmikrofon-Übertragungstechnik anstelle von bisher analog realisierten Schaltungen zum Einsatz kommen sollen.

Durch umfangreiche Hörvergleiche mit Hilfe einer speziellen Software-Simulationsumgebung werden geeignete, klanglich vorteilhafte Kompander-Einstellungen getroffen und für die letzte Auswahl und Feinabstimmung einem systematischen Hörtest mit mehreren Probanden aus dem professionellen Audiobereich unterzogen. Die Hörbeispiele umfassen dabei ein breites Spektrum von für den Einsatz typischen Tonmaterialien; hinzu kommen sowohl reale als auch künstlich generierte Rauschstörungen zur Simulation unterschiedlicher Empfangsbedingungen. Zusätzlich wird der Frage nachgegangen, ob und auf welche Weise durch das dezente Bearbeiten des kompandierten Signals mit bestimmten zusätzlichen DSP-Effekten eine subjektive Klangverbesserung zu erzielen ist.

Abstract

This diploma thesis deals with the survey of different digital compandor systems which are supposed to replace the current analog solutions in wireless microphone technology in the future.

By means of a special software simulation environment, advantageous sounding parameter definitions are developed, which are finally evaluated and selected within an extensive listening test with several audio-professional participants. The listening examples represent a wide spectrum of typical audio material. Furthermore, different levels of both real and artificially generated noise are added in order to simulate different receiving conditions. Additional investigations discuss the possibility of improving the subjective impression of the companded audio signal by adding particular DSP effects.

Vorwort

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern der Sennheiser-Entwicklungsabteilung, die bei allen auftretenden Fragen stets große Hilfsbereitschaft gezeigt und so entscheidend zum Gelingen der vorliegenden Untersuchung beigetragen haben. Meine besondere Anerkennung gilt dabei Herrn Prof. Dr. Jürgen Peissig, der die Betreuung für die Firma Sennheiser übernommen und damit diese Diplomarbeit ermöglicht hat. Ebenso danke ich den Herren Dr. Heinrich Esser und Dr. Wolfgang Niehoff für ihre freundliche Unterstützung.

Ein Teil dieser Untersuchungen basiert auf einem Hörvergleich am Erich-Thienhaus-Institut der Hochschule für Musik Detmold. Danke an alle Kommilitonen, die sich hierfür zur Verfügung gestellt und damit einen wichtigen Beitrag zu einem aussagekräftigen Versuchsergebnis geleistet haben. Des weiteren danke ich meinem Kommilitonen Christoph Terbuyken sowie den „Max-Raabe-Leuten“ für die Bereitstellung der hervorragenden Klangbeispiele.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Thomas Görne, der die vorliegende Untersuchung seitens der Hochschule für Musik Detmold betreut und mich in allen Fragen kompetent beraten hat.

Detmold, im August 2004

Daniel Schleef

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kompandersysteme – Theoretische Grundlagen	3
2.1	Aufbau und Funktionsweise	3
2.2	Parameter	5
2.2.1	Einhüllendenermittlung	5
2.2.2	Kennlinien-Definition	10
2.2.3	Zeitkonstanten	11
2.3	Typ-Einteilungen	13
2.4	Stand der Technik	14
2.4.1	Technische Entwicklung bei Sennheiser	14
2.4.2	Stand der Technik beim Wettbewerb	15
2.4.3	Probleme der aktuellen Sennheiser-Systeme	16
2.5	Besonderheiten einer digitalen Realisierung	18
2.5.1	Vorteile	18
2.5.2	Nachteile	19
3	Vorüberlegungen	20
3.1	Zum Konzept der Hörvergleiche	20
3.2	Psychoakustische Aspekte	22
4	Klangvergleich verschiedener digitaler Algorithmen	24
4.1	Auswahl von Audio-Testbeispielen	24
4.2	Beschreibung der Simulationsumgebung	26
4.3	1. Abschnitt: Klangliche Vorauswahl	29
4.4	2. Abschnitt: Verifizierung und Feinauswahl	30
4.4.1	Versuchsaufbau	30
4.4.2	Praktische Durchführung	30
4.5	Zusätzliche Beeinflussung durch DSP-Effekte	32
4.5.1	Kompression	32
4.5.2	Frequenzgesteuerte Obertongenerierung	32
4.5.3	Frequenzgesteuerte Kompression	33
5	Auswertung	34
5.1	Ergebnisse der Vorauswahl	34
5.2	Ergebnisse des Probanden-Hörvergleichs	37
5.3	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	48
5.4	Konkrete Empfehlungen für die Praxis	50
6	Zusammenfassung und Ausblick	52
A	Inhalt der beiliegenden CD-ROM	55
	Literaturverzeichnis	56
	Erklärung	57

Abbildungsverzeichnis

2.1	Funktionsweise der Kompander-Rauschunterdrückung	3
2.2	Prinzipdarstellung eines komplementären Kompanders	4
2.3	Phasenverzerrungen zwischen Kompressor und Expander	5
2.4	Attack- und Release-Fall der Detektorschaltung bei Einhüllendenermittlungsverfahren „Peak“	7
2.5	Attack- und Release-Fall der Detektorschaltung bei Einhüllendenermittlungsverfahren „Peak (release loss input)“	8
2.6	Detektorschaltung bei Einhüllendenermittlungsverfahren „RMS“	8
2.7	Attack- und Release-Fall der Detektorschaltung bei Einhüllendenermittlungsverfahren „RMS (release loss input)“	9
2.8	Typische Kompander-Kennlinien	10
2.9	Entstehung von Rauschfahnen	12
2.10	Beispiel für Handsender: <i>Sennheiser SKM 5000</i>	15
2.11	Beispiel für Taschensender: <i>Sennheiser SK 5012</i>	15
2.12	Typischer Empfänger: <i>Sennheiser EM 3031</i>	16
3.1	Vorverdeckung, simultane Verdeckung und Nachverdeckung	23
4.1	<i>CompExSimPlus</i> – Kompander-Konfiguration	26
4.2	<i>CompExSimPlus</i> – Parameter-Einstellungen	26
4.3	<i>CompExSimPlus</i> – Signalweg bei Einschleifung einer externen Funkstrecke	27
5.1	Paarvergleich 1: Einhüllendenermittlungsverfahren	37
5.2	Paarvergleich 2: Einhüllendenermittlungsverfahren	38
5.3	Paarvergleich 3: Einhüllendenermittlungsverfahren	38
5.4	Paarvergleich 4: Einhüllendenermittlungsverfahren	38
5.5	Paarvergleich 5: Einhüllendenermittlungsverfahren	39
5.6	Paarvergleich 6: Einhüllendenermittlungsverfahren	39
5.7	Paarvergleich 7: Kompanderkennlinien	39
5.8	Paarvergleich 8: Kompanderkennlinien	40
5.9	Paarvergleich 9: Kompanderkennlinien	40
5.10	Paarvergleich 10: Zeitkonstanten	40
5.11	Paarvergleich 11: Zeitkonstanten	41
5.12	Paarvergleich 12: „Hidden reference“	41
5.13	Paarvergleich 13: Oberton-Addition (k_2, k_3)	41
5.14	Paarvergleich 14: Einhüllendenermittlungsverfahren	42
5.15	Paarvergleich 15: Einhüllendenermittlungsverfahren	42
5.16	Paarvergleich 16: Einhüllendenermittlungsverfahren	42
5.17	Paarvergleich 17: Kompanderkennlinien	43
5.18	Paarvergleich 18: Oberton-Addition (k_2/k_3)	43
5.19	Paarvergleich 19: Kompression	43
5.20	Paarvergleich 20: Unterschied. Zeitkonstanten	44
5.21	Paarvergleich 21: Frequenzgesteuerte Kompression (DeHisser)	44
5.22	Paarvergleich 22: Frequenzgesteuerte Kompression (DeHisser)	44
5.23	Paarvergleich 23: Identische Beispiele	45

1 Einleitung

Die analoge Audiotechnik hat prinzipbedingt immer mit bei der Übertragung auftretendem Störrauschen zu kämpfen. Schon zu Zeiten analoger Tonbandaufzeichnungen stellte das Eigenrauschen der Magnettonbänder besonders bei niedrigen Signalpegeln ein Problem dar: Laute Signale, die in ihrer Dynamik deutlich über dem Rauschteppich lagen, konnten ohne Probleme übertragen werden; leise Signale jedoch wurden vom Rauschen stark in Mitleidenschaft gezogen oder vollständig verdeckt.

Im Bereich der Hochfrequenz-Übertragungstechnik stellt sich das Problem noch heute: Da die Funkübertragung bei drahtlosen Mikrofonanlagen bisher fast ausschließlich analog realisiert wird, gibt es auch hier das Phänomen eines je nach Übertragungssituation mehr oder weniger ausgeprägten Störrauschens, das die nutzbare Dynamik auf dieselbe Art und Weise wie bei analogen Tonbändern einschränkt. Dabei ist gerade in den für drahtlose Mikrofone typischen Anwendungsfällen eigentlich eine besonders große Systemdynamik gefragt: Die Mikrofone werden meist aus extrem geringer Entfernung besprochen und sind daher einer großen Signaldynamik ausgesetzt; hinzu kommen meist laute Umgebungsgeräusche, beispielsweise von anderen Instrumenten auf der Bühne. Dem gegenüber stehen die Auflagen der RegTP¹ und anderer Gremien, welche den nutzbaren Bereich des Sendefrequenzbandes sowie insbesondere die maximale Sendeleistung genau festlegen, was den Spielraum der Hersteller bezüglich Bandbreite und vor allem eben auch Dynamik stark einschränkt.

Diese Problematik führte ab circa 1960 im Bereich der analogen Schallaufzeichnung und später auch im Bereich der Hochfrequenz-Übertragungstechnik zur Entwicklung verschiedener Rauschunterdrückungssysteme, sogenannter Kompanderverfahren, deren genaue Funktionsweise im nächsten Kapitel beschrieben wird.

Mit dem Beginn des Digital-Zeitalters in der Audiowelt zu Beginn der 1980er Jahre entfiel die Notwendigkeit einer Rauschunterdrückung: Auch wenn die ersten Analog/Digital- bzw. Digital/Analog-Wandler alles andere als rauscharm arbeiteten und mit der neuen Technik auch neue Probleme wie Quantisierungsfehler und dadurch bedingte neuartige Verzerrungen des Audiosignals auftraten, war die reine Übertragung der digitalen Informationen prinzipbedingt wesentlich unproblematischer.

Mit einer Digitalisierung der Funkstrecke würde auch im Bereich der Hochfrequenztechnik die Notwendigkeit für ein Kompandersystem entfallen. Wie in Kapitel 6 näher ausgeführt wird, lässt sich dies derzeit jedoch aus verschiedenen Gründen nur mit sehr großem Aufwand realisieren und stellt daher mittelfristig keine Alternative dar. Im Bereich der Kompandersysteme gäbe es hingegen bereits jetzt großes Verbesserungspotenzial, wenn man trotz analoger Funkstrecke zumindest diese auf der digitalen Ebene arbeiten ließe. Die zahlreichen Vorteile einer solchen sogenannten Hybridstrecke gegenüber

¹Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post

dem bisherigen, vollständig analog arbeitenden System werden im nächsten Kapitel in Abschnitt 2.5 aufgezeigt.

Als Ergebnis einer Diplomarbeit [8] aus dem Jahr 2003 existiert bereits eine per PC-Software realisierte Simulationsumgebung, die es ermöglicht, digitale Kommandersysteme unterschiedlicher Arbeitsweisen und Parameter zu vergleichen. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese nun einem systematischen Hörvergleich unterzogen. Um hier zu einem aussagekräftigen, möglichst objektiven Ergebnis zu kommen, werden die letzten Feinabstimmungen im Rahmen eines umfangreicheren Hörvergleichs am Erich-Thienhaus-Institut der Hochschule für Musik Detmold verifiziert.

Die im Rahmen der Hörtests verwendeten Audiobeispiele, mit deren Hilfe die optimalen Kommandereinstellungen getroffen werden, orientieren sich eng an den alltäglichen Einsatzgebieten für drahtlose Mikrofonanlagen. Auch besonders kritische Signale kommen zum Einsatz, die den heutigen analogen Kommandersystemen häufig Probleme bereiten und im Rahmen einer neuen Kommander-Abstimmung daher besonderer Beachtung bedürfen.

Die Auswertung der Testergebnisse und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen für die Praxis (Kapitel 5) ermöglichen die Definition von klanglich optimalen Kommander-Parametern, welche die Grundlage für eine Weiterentwicklung der Sennheiser-Drahtlosmikrofonanlagen bilden sollen. Kapitel 6 gibt schließlich einen Ausblick auf langfristige Herausforderungen und Möglichkeiten.

Dieser Arbeit liegt außerdem eine CD-ROM bei, deren Inhalt im Anhang A aufgelistet ist.

2 Komandersysteme – Theoretische Grundlagen

2.1 Aufbau und Funktionsweise

In der Einleitung wurde bereits beschrieben, welche Probleme bei einer Signalübertragung durch Störgeräusch entstehen. Die Lösung dieses Problems besteht im Prinzip darin, die Aussteuerung des analogen Systems bei schwachen Signalen zu vergrößern, um mit den zu übertragenden Informationen nicht in die Nähe des Rauschteppichs zu gelangen und diese so ohne klangliche Beeinträchtigungen übertragen zu können. Durch diese Maßnahme allein würde allerdings die Dynamik des Originalsignals stark eingeschränkt, was insbesondere bei der Übertragung von Musik zu sehr unbefriedigenden und unnatürlich wirkenden Klangergebnissen führen kann. Das hingegen lässt sich nur vermeiden, indem man nach der analogen Signalübertragung dieselbe Dynamikregelung genau umgekehrt anwendet: Passagen, die vor der Signalübertragung angehoben wurden, müssen hinter der Übertragungsstrecke wieder abgesenkt werden, um die Originaldynamik des Ursprungssignals wiederherzustellen.

Aus naheliegenden Gründen wäre es nicht praktikabel, eine solche Dynamikregelung manuell auszuführen. Statt dessen wird diese Regelung durch ein automatisiertes System vorgenommen, einen sogenannten *Kompander*.

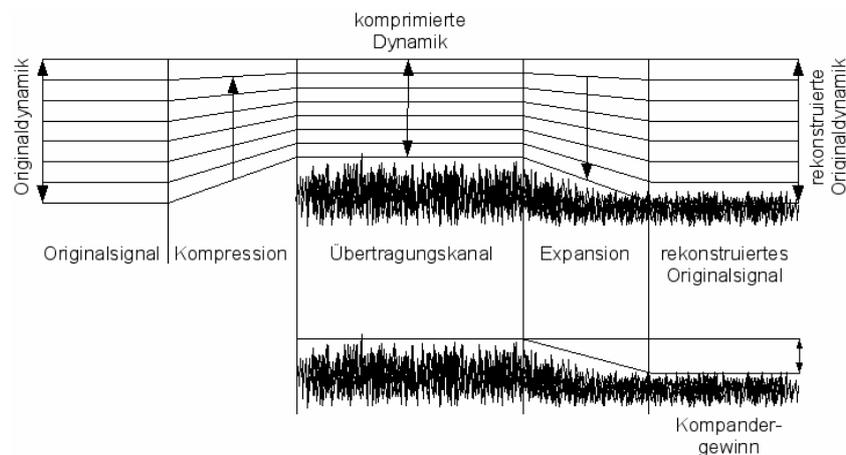


Abb. 2.1: Funktionsweise der Kompander-Rauschunterdrückung

Dabei handelt es sich um eine Kombination der beiden Begriffe „Kompressor“ und „Expander“, welche die beiden Hälften des Systems bilden. Vor der Signalübertragung wird nach einer definierten Kennlinie die Dynamik wie beschrieben eingegrenzt: Je geringer der Pegel des Eingangssignals, umso höher ist die Verstärkung; dies entspricht dem Verhalten eines Kompressors. Nach erfolgter Übertragung wird durch Expandieren, also das Absenken der vorher angehobenen Signalanteile um den jeweils genau umgekehrten Betrag, die Originaldynamik wiederhergestellt. Durch die Expander-Regelung werden je-

doch nicht nur die im Kompressor angehobenen Signale wieder abgesenkt, sondern auch das Störuschen, das mittlerweile durch die Übertragungstrecke hinzugekommen ist. Auf diese Art und Weise vergrößert sich der dynamische Abstand zwischen Nutzsignal und Rauschen, und das Nutzsignal wird, wie Abbildung 2.1 auf Seite 3 veranschaulicht, gewissermaßen über den Rauschteppich „hinweggehoben“.

Im Laufe der Jahre etablierten sich im Tonaufzeichnungs-Bereich verschiedene Kompan-derverfahren, die teilweise ausschließlich im Bereich der professionellen Tonaufnahmen (beispielsweise *Dolby A*, *Telcom c4*), teilweise aber auch in den Geräten des heimischen Anwenders (*Dolby B*, *Dolby C*, *HighCom*) Einzug erhielten. Das grundsätzliche Prinzip all dieser Verfahren ist jedoch dasselbe.

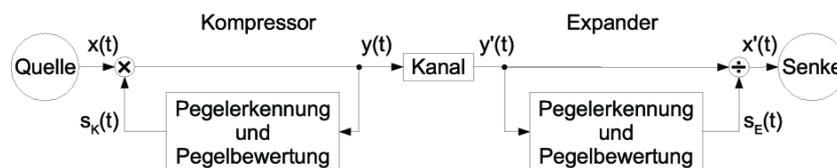


Abb. 2.2: Prinzipdarstellung eines komplementären Kompanders (Quelle: [8])

Abbildung 2.1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau jedes Kompandersystems: Eine zentrale Rolle spielt die sogenannte Detektorstufe von Kompressor und Expander, die den Pegel des Eingangssignals erkennt und so die jeweilige Verstärkung des VCA² bestimmt, welcher in der Grafik entsprechend der mathematischen Operation auf digitaler Ebene mit einem Multiplikations- bzw. Divisionszeichen dargestellt ist. Die Pegelerkennung wird auch als Einhüllendenermittlung³ bezeichnet; hier gibt es unterschiedliche Verfahren, auf die in Abschnitt 2.2.1 eingegangen wird.

Die Notwendigkeit, dass das Kompander-System die Originaldynamik des Signals erhalten muss, führt zur zentralen Forderung nach einem sogenannten komplementären Kompander, bei dem Kompressor und Expander exakt entgegengesetzt arbeiten. Nicht-komplementäre Systeme verändern das Originalsignal gezielt in eine bestimmte Richtung und sind daher im Zusammenhang mit dieser Aufgabenstellung nicht von Interesse; statt dessen soll die ursprüngliche Information möglichst ohne hörbare Verluste oder Artefakte wiederhergestellt werden.

²Abk.: voltage controlled amplifier

³Der zeitliche Dynamikverlauf eines Signals zeigt sich in dessen „Hüllkurve“, „Envelope“ oder „Einhüllenden“.

2.2 Parameter

2.2.1 Einhüllendenermittlung

Bei der Konzeption eines Kommandersystems ist insbesondere die Art der bereits in Abschnitt 2.1 erwähnten Einhüllendenermittlung von zentraler Bedeutung. Sprach- und Musikmaterial besteht grundsätzlich aus sogenannten nicht-deterministischen, also nicht „vorhersehbaren“ Signalen, weshalb bei einer Pegelerkennung in Echtzeit automatisch gewisse Fehler entstehen müssen. Diese gilt es zu minimieren: Das Einhüllendenermittlungsverfahren muss einerseits große Dynamiksprünge zuverlässig und nicht zu träge abbilden können, andererseits müssen jedoch nichtlineare Verzerrungen durch zu „schnelle“ Änderungen der gebildeten Einhüllenden möglichst vermieden werden.

Ein weiteres Problem, auf das die verschiedenen Verfahren unterschiedlich reagieren, sind die auf Analogstrecken auftretenden Gruppenlaufzeiten. Abbildung 2.2.1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen solchen Phasenverzerrungen und der resultierenden Einhüllenden im Expander: In *a* und *b* werden jeweils dieselben zwei Signale addiert, allerdings ist die Phasenlage der Signale zueinander unterschiedlich. Das Resultat sind zwei völlig verschiedene Summensignale. Auf diese Art und Weise können auch Phasenfehler zwischen Kompressor und Expander eine fehlerhafte dynamische Rekonstruktion im Expander bewirken, was zum Beispiel durch das typische „Pumpen“ des Signals hörbar wird.

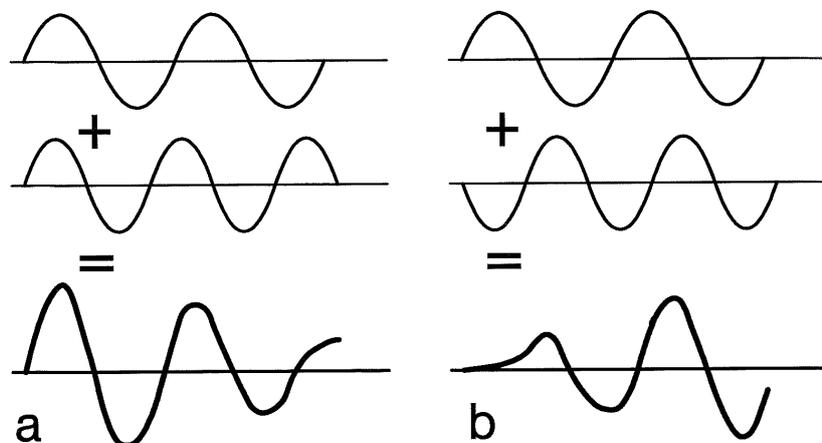


Abb. 2.3: Phasenverzerrungen zwischen Kompressor und Expander verursachen fehlerhafte Signal-Rekonstruktion (Quelle: [9])

Die Simulationssoftware *CompExSimPlus*, deren detaillierte Beschreibung in Abschnitt 4.2 erfolgt, kennt in der aktuellen Version 2.2.1 sechs verschiedene Verfahren zur Einhüllendenermittlung:

- Spitzenwertermittlung (Peak)
- Spitzenwertermittlung (Peak, release loss input)
- Effektivwertermittlung (RMS)
- Effektivwertermittlung (RMS, release loss input)
- Modifizierte Spitzenwertermittlung nach dem *HighCom*-Prinzip
- Ermittlung durch Hilbert-Transformierte

Da die ersten vier dieser Verfahren im Verlauf der *CompExSimPlus*-Weiterentwicklung einige Modifikationen erfahren haben, wird der in der aktuellen Version verwendete entsprechende C++-Quellcode im Folgenden dokumentiert. Eine genauere Erläuterung der programmiertechnischen Implementierung erfolgt in [8].

Der in Listing 1 dokumentierte Programmcode erzeugt eine Detektorstufe, deren Funktionsweise im entsprechenden Signalfussgraphen (Abbildung 2.2.1) veranschaulicht ist. Bei jedem Einhüllendenermittlungsverfahren wird der aktuelle Signalpegel mit dem bisherigen verglichen, was im Schaltbild durch einen verzögerten Rückkopplungs-Zweig dargestellt wird. Übersteigt der aktuelle Abtastwert die bisherige Einhüllende, liegt eine steigende Flanke vor (Attack); ist der Pegel niedriger, wird eine fallende Flanke detektiert (Release). Die „Reaktionsgeschwindigkeit“, nach der diese Entscheidung erfolgt, hängt ab von den jeweils definierten Attack- und Release-Zeiten. Die „release loss input“-Variante unterscheidet sich ausschließlich durch ihr Release-Verhalten.

Listing 1: Peak

```
// PEAK
if ((float)fabs(ein) > *env_alt) // ATTACK
{ // ATTACK
  *env = (1 - AT) * *env_alt + AT * (float)fabs(ein);
  m.at_rt = 0;
}
else
{ // RELEASE
  *env = (1 - RT) * *env_alt + RT * (float)fabs(ein);
  m.at_rt = 1;
}
*env_alt = *env;
break;
```

Listing 2: Peak (Release loss input)

```
// PEAK (release loss input)
if ((float)fabs(ein) > *env_alt) // ATTACK
{ // ATTACK
  *env = (1 - AT) * *env_alt + AT * (float)fabs(ein);
  m.at_rt = 0;
}
else
```

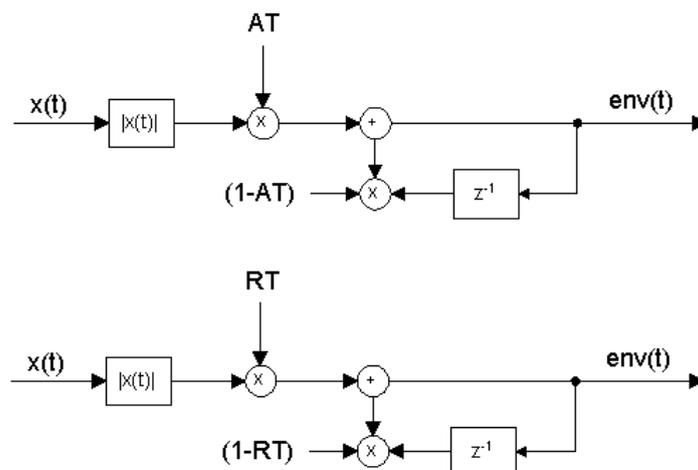


Abb. 2.4: Attack- und Release-Fall der Detektorschaltung bei Einhüllendenermittlungsverfahren „Peak“

```

{ // RELEASE
  *env = (1 - RT) * *env_alt;
  m_at_rt = 1;
}
*env_alt = *env;
break;

```

Beim RMS-Verfahren erfolgt zunächst eine quadratische Mittelwertbildung bzw. Effektivwertbildung⁴, aus der dann die Einhüllende detektiert wird. Durch den in Listing 3 dargestellten Algorithmus entsteht eine Detektorschaltung, wie sie in Abbildung 2.2.1 schematisch dargestellt ist. Auch hier lassen sich Attack- und Release-Zeit getrennt definieren, und wie beim Peak-Verfahren wurde eine leicht abgeänderte „release loss input“-Variante realisiert. Durch die Effektivwertbildung erhält man einen relativ „trägen“ und damit kontinuierlichen Einhüllendenverlauf, allerdings werden steile Signalfanken durch diese „Trägheit“ nur unzureichend abgebildet. Das RMS-Verfahren ist außerdem wesentlich unempfindlicher gegen Gruppenlaufzeiten, wie sie in aktuellen Sennheiser-Systemen auftreten (siehe Abschnitt 2.4.3).

⁴Die Abkürzung RMS entstammt dem im Englischen gebräuchlichen Ausdruck „Root Mean Square“.

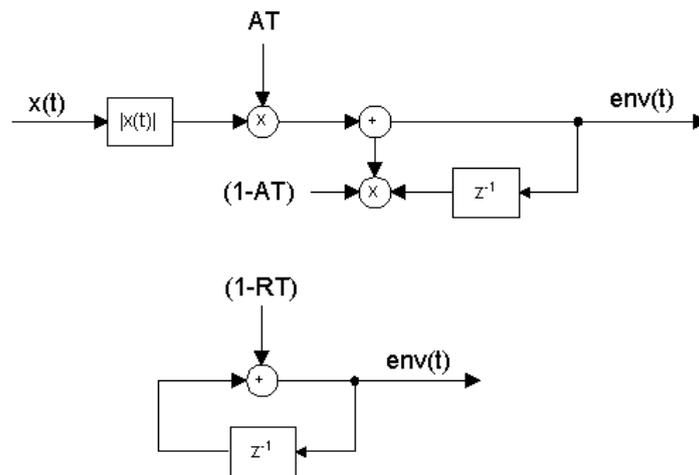


Abb. 2.5: Attack- und Release-Fall der Detektorschaltung bei Einhüllendenermittlungsverfahren „Peak (release loss input)“

Listing 3: RMS

```
// RMS
if ((float) fabs(ein) > *env_alt) // ATTACK
{ // ATTACK
  *ein_alt = (1-AT) * *ein_alt + AT * ein * ein;
  m_at_rt = 0;
}
else
{ // RELEASE
  *ein_alt = (1-RT) * *ein_alt + RT * ein * ein;
  m_at_rt = 1;
}
*env = (float) sqrt(*ein_alt);
*env_alt = *env;
break;
```

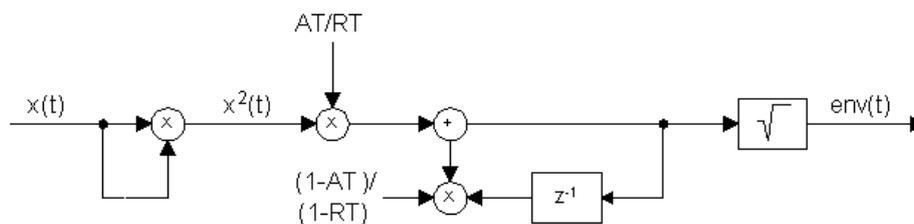


Abb. 2.6: Detektorschaltung bei Einhüllendenermittlungsverfahren „RMS“

Listing 4: RMS (Release loss input)

```

// RMS (Release loss input)
if ((float)fabs(ein) > *env_alt) // ATTACK
{ // ATTACK
  *ein_alt = (1-AT) * *ein_alt + AT * ein * ein;
  m_at_rt = 0;
}
else
{ // RELEASE
  *ein_alt = (1-RT) * *ein_alt;
  m_at_rt = 1;
}
*env = (float)sqrt(*ein_alt);
*env_alt = *env ;
break;

```

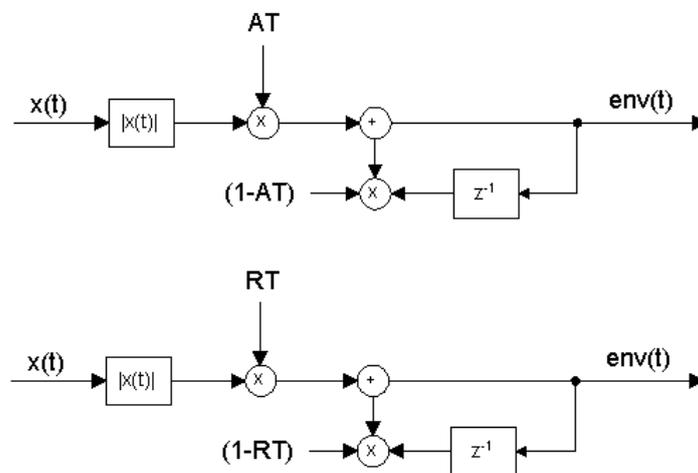


Abb. 2.7: Attack- und Release-Fall der Detektorschaltung bei Einhüllendenermittlungsverfahren „RMS (release loss input)“

Das *HighCom*-Verfahren, welches die Grundlage für die entsprechende Modifikation des Spitzenwert-Verfahrens bildet, wurde von Ernst F. Schröder [6] für die Firma Telefunken entwickelt und stellte gewissermaßen die Consumer-Variante des für die CompactCassette entwickelten Verfahrens *Telcom c4* dar. Es ist im Gegensatz zu allen anderen Verfahren durch eine zweifache Release-Konstante charakterisiert, die es ermöglicht, dem Signalpegel schnell zu folgen und gleichzeitig die Entstehung von Rauschfahnen zu vermeiden. Das nach dem *HighCom*-Prinzip modifizierte Peak-Einhüllendenermittlungsverfahren sowie das Einhüllendenermittlungsverfahren nach der Hilbert-Transformation wurde gegenüber der ersten Programmversion nicht verändert, daher sei für eine ausführliche Dokumentation wiederum auf [8] verwiesen.

2.2.2 Kennlinien-Definition

Die Kennlinie eines Kompanders lässt sich durch Einstellung von *Kompressionsfaktor* und *Threshold* definieren. Anhand einer typischen Kompanderkennlinie (Abbildung 2.2.2) werden diese beiden Parameter veranschaulicht.

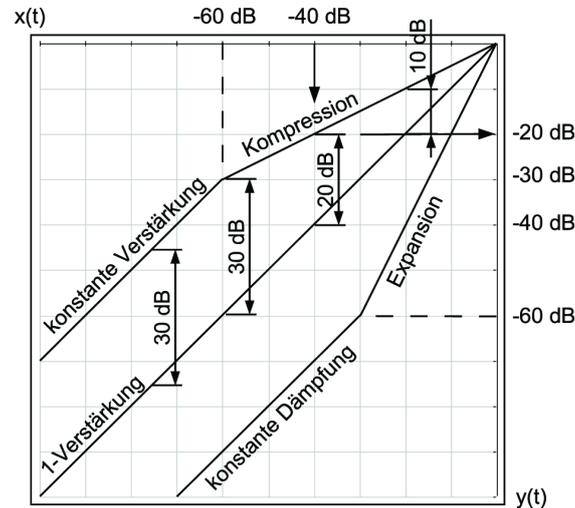


Abb. 2.8: Typische Kompander-Kennlinien (Quelle: [8])

Der Threshold⁵-Wert definiert den unteren Grenzpegel, ab dem die Kompressor- bzw. Expanderregelung arbeitet. In Abbildung 2.2.2 bildet er den „Knickpunkt“ in der bis dahin im Bereich der 1:1-Verstärkung verlaufenden Kurve (hier bei -60 dB).

Der Kompressionsfaktor⁶ stellt das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangspegel des Kompressors dar; er schlägt sich grafisch in der Steigung der Kennlinie jenseits des Threshold-Punktes nieder und liegt typischerweise zwischen 1 (Eingangssignal wird ohne Kompression bzw. Expansion 1 : 1 wieder ausgegeben) und maximal 5 (extrem starke Kompression). Je stärker die Kompression, je höher also die Verstärkung von leisen Signalen ist, desto stärker muss auch der Empfänger hinter der Funkstrecke das Signal wieder expandieren.

Auch wenn ein Kompander exakt komplementär arbeitet und damit die oben aufgestellte Forderung erfüllt, ist eine vollständige Wiederherstellung des Originalsignals nur theoretisch möglich: Sobald durch die Übertragungsstrecke Störgeräusche hinzugekommen ist, unterscheidet sich das Signal vor dem Expander vom Signal hinter dem Kompressor. Dadurch sind trotz der komplementären Regelung von Kompressor- und Expanderstufe nichtlineare Verzerrungen gewissen Grades bei Kompandern prinzipiell unvermeidbar. Diese Tatsache gilt es auch bei der Wahl der Kompanderkennlinien zu bedenken: Bei einem

⁵deutsch: Schwelle

⁶auch: *ratio* (engl.)

hohen Kompressionsfaktor arbeitet die Rauschunterdrückung zwar besonders wirksam, allerdings erhöhen sich auch die Verzerrungen. So kann zwar selbst unter sehr schlechten Empfangsbedingungen mit einer starken Kompression bzw. Expansion eine erstaunliche Rauschunterdrückung realisiert werden, aber die klanglichen Beeinträchtigungen des Audiosignals relativieren dieses Ergebnis.

Bei durchschnittlichem Sprach- oder Musikmaterial fällt der Signalpegel zu hohen Frequenzen hin ab; gleichzeitig wird das Störrauschen in diesem Bereich aber als besonders störend empfunden. Dies führte im Bereich der hohen Frequenzen zu einer zusätzlichen Rauschunterdrückungsmaßnahme, der *Emphasis*-Stufe. Dabei werden die hohen Frequenzen vor der Übertragung nach einer definierten Kennlinie angehoben (Preemphasis) und hinter der Funkstrecke wieder abgesenkt (Deemphasis). Auf ähnliche Art wie bei Kommandersystemen wird so also im Hochtonbereich eine besonders effektive Rauschunterdrückung erzielt. Nachteile einer Emphasis-Schaltung sind die naturgemäß geringere Hochton-Aussteuerbarkeit, was aber aufgrund der Energieverteilung in gewöhnlichem Audiomaterial recht unkritisch ist, sowie eventuelle Verzerrungen, die durch diese zusätzliche Schaltung entstehen können.

2.2.3 Zeitkonstanten

Weitere wichtige Parameter für das Verhalten eines Kompressors und Expanders sind die zeitlichen Regelgrößen: Begriffe wie „Response/Decay Time“ oder hier „Attack/Release“-Verhalten beschreiben die Geschwindigkeit, mit der die Dynamikregelung auf Pegeländerungen des Signal reagiert. Die Regelzeiten des Systems müssten dabei idealerweise an die jeweilige Frequenz des Signals angepasst sein: Wenn die Schwingungsperiode einer Frequenz bereits vor ihrem ersten Amplitudenmaximum gedämpft wird, wird die Ursprungsfrequenz verzerrt. Dieser Zeitpunkt ist aber natürlich abhängig von der Wellenlänge und damit von der Frequenz. Unterschiedliche zeitliche Einstellungsmöglichkeiten für die verschiedenen Frequenzbänder sind daher ein großer Vorteil von Multiband-Kommandern.

Ein Kommander soll idealerweise nur die Signale bearbeiten, deren Pegel durch die Kommanderkennlinie entsprechend definiert sind. Besonders bei sehr schnell wechselnden Signalpegeln spielt daher das Attack/Release-Verhalten eine große Rolle. Ist die Attack-Zeit zu lang, so erfahren plötzliche Pegelspitzen eine viel zu starke Anhebung, und sogenannte „Overshoots“, die meist als Übersteuerungen hörbar werden, sind die Folge. Aber auch eine zu schnelle Regelung ist problematisch: Wird die ursprüngliche Wellenform einer Schwingung allzu hart begrenzt, ergibt sich derselbe Effekt wie beispielsweise beim „Soft-Clipping“ von Verstärkern, und es entstehen Oberwellen, die sich als Klirrfaktor und damit klanglich unschöne Verzerrungen bemerkbar machen. Auch im Ausklingen von Tönen kann eine extrem kurze Attack-Zeit zu ständig wechselnden und damit hörbaren Regelungen führen.

Die ideale Abstimmung des Release-Verhaltens ist ähnlich zweischneidig: Ein zu kurzer Release-Wert führt zur Verfälschung von ausklingenden Signalen. Greift der Mechanismus nach hohen Signalpegeln zu langsam, ist für kurze Zeit ein erhöhter Rauschpegel zu hören, was als „Rauschmodulation“ oder „Rauschatmen“ bekannt ist; bei deutlichem Rauschen im Anschluss an hohe Pegelspitzen spricht man von Rauschfahnen, die in Abbildung 2.2.3 grafisch illustriert sind.

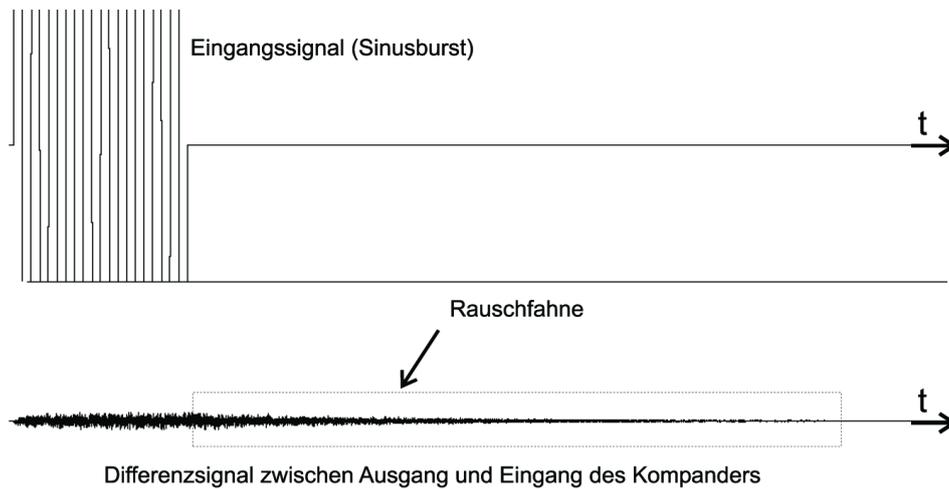


Abb. 2.9: Entstehung von Rauschfahnen durch zu lange Release-Zeit (Quelle: [8])

Die Regelvorgänge des Kompondersystems werden besonders anhand von Hintergrundgeräuschen im Ursprungssignal hörbar. Oftmals werden diese Hintergrundgeräusche bei ungünstigen Attack- und Release-Zeiten mit lauterem Signalanteilen moduliert, und man spricht vom typischen „Pumpen“ des Signals.

Das *HighCom*-Einhüllendenermittlungsverfahren⁷ ist im Zusammenhang mit Zeitkonstanten besonders erwähnenswert: Es ist als einziges durch eine zweistufige Release-Einstellungsmöglichkeit charakterisiert. Der aktuelle Signalpegel wird zu zwei verschiedenen Zeitpunkten mit der bisherigen Einhüllenden verglichen, was eine wirksame Unterdrückung von Rauschfahnen bei dennoch möglichst wenig Artefakten erleichtern soll. Die Sekundenbruchteile zwischen beiden Detektionen lassen sich durch das sog. *HighCom*-Delay definieren.

⁷siehe Abschnitt 2.2.1

2.3 Typ-Einteilungen

Grundsätzlich existieren drei verschiedene Konzepte zur Realisierung eines Kompan-
dersystems: Man unterscheidet zwischen Breitband- (oder Einband-) Kompan-
der, Multi-
band- (oder Mehrband-) Kompan-
dern und Gleitband-Kompan-
dern. Der Fortschritt
beim Multiband-Kompan-
der gegenüber einem Breitband-System liegt in dessen Fähig-
keit, das zu komprimierende und wieder zu expandierende Audiosignal in verschiedene
Frequenzbänder aufzuteilen und diese jeweils getrennt und mit unterschiedlichen Para-
metereinstellungen zu bearbeiten. Dieses Verfahren bringt sehr offensichtliche Vorteile
mit sich: Statt immer das gesamte Signal dynamisch zu bearbeiten, wird die Regelung
immer auf den jeweils entscheidenden Frequenzbereich beschränkt, ohne das restliche
Spektrum des Signals zu beeinflussen. Aber auch bei breitbandigen Signalen hat ein
Multiband-Kompan-
der den wichtigen Vorteil, seine Regelzeiten den unterschiedlichen
Frequenzbändern anpassen zu können. Dadurch ist eine wesentlich effektivere Kompres-
sion und Expansion des Audiosignals möglich, und die hörbaren Artefakte werden stark
reduziert.

Die in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Emphasis-Regelung macht übrigens bei einem Multi-
band-Kompan-
der keinen Sinn mehr: Durch die Multiband-Fähigkeit des Systems ist
bereits gewährleistet, dass im Hochtonbereich eine besonders effektive Kompression bzw.
Expansion vorgenommen wird.

Eine Weiterentwicklung der Multiband-Lösung, die jedoch in der verwendeten Simu-
lationsumgebung nicht implementiert ist und damit im Rahmen dieser Arbeit nicht
untersucht werden kann, stellt schließlich der Gleitband-Kompan-
der dar, in dem nur
ein Teil des Frequenzspektrums bei variabler Grenzfrequenz der jeweiligen dynamischen
Bearbeitung unterzogen wird.

2.4 Stand der Technik

2.4.1 Technische Entwicklung bei Sennheiser

Obwohl bereits in den 1960er Jahren drahtlose Mikrofonanlagen beim Fernsehen verwendet wurden und Kommandersysteme bei Bandmaschinen im Bereich der Tonaufnahme längst im Einsatz waren, war es zunächst problematisch, Kompander auch in der Hochfrequenz-Übertragungstechnik zu etablieren: Verfahren wie *Dolby*, *Telcom* und andere waren schaltungstechnisch zu aufwändig, als dass man sie in drahtlose Mikrofone oder Taschensender mit begrenztem Platz und Batterielaufzeit hätte implementieren können.

In den 1970er Jahren gab es bei Sennheiser mehrere entscheidende Neuerungen im Bereich der Drahtlosteknik: Der Eintritt ins UHF⁸-Band begann, erste Diversity-Verfahren⁹ kamen zum Einsatz, und mit *HiDyn* gab es das erste im großen Stil einsetzbare Kompanderverfahren, das viele Jahre lang in verschiedenen Sennheiser-Modellen verwendet wurde. Das Verfahren sah keinerlei Frequenzband-Beeinflussungen vor, sondern die Dynamikbearbeitung geschah mit einem aus heutiger Sicht recht einfachen Breitband-Kompander über das gesamte Frequenzband. Mit der *HiDyn*-Technik verbesserte sich die übertragbare Signaldynamik auf 95 dB.

Die nächste Entwicklungsstufe bildete ca. 1990 *HiDynPlus*. In diesem System kam zum ersten Mal auch eine Pre-/Deemphasis-Stufe¹⁰ zum Einsatz. Die neuartige Schaltung ermöglichte erstmalig eine unabhängige Attack- und Release-Zeit, die allerdings pegelabhängig ist: Bei Vollaussteuerung liegt die Attack-Zeit bei 7,5 und die Release-Zeit bei 30 Millisekunden. Bei niedrigeren Pegeln verlängern sich sowohl Attack- als auch Release-Zeit deutlich um bis zu Faktor 3, was klanglich allerdings nicht unvorteilhaft zu sein scheint. Diese Pegelabhängigkeit der Zeitkonstanten ist in der zur Verfügung stehenden Simulationssoftware *CompExSimPlus* nicht implementiert, so dass eine klangliche Untersuchung der digitalen Systeme in dieser Richtung nicht möglich ist.

Die *HiDynPlus*-Kennlinie kennt keinen Threshold; statt dessen werden alle Frequenzen mit einem Kompressionsfaktor von ungefähr 2 kompandiert, so dass eine Dynamikerweiterung von circa 60 dB ohne Kompander auf bis zu 115 dB möglich ist. Das übertragende Frequenzspektrum liegt dabei zwischen circa 80 und 20.000 Hertz.

Seit ungefähr 1998 ist bei Sennheiser mit *HDX* ein weiteres Kompanderverfahren im Einsatz, welches sich in einigen Punkten leicht von *HiDynPlus* unterscheidet, allerdings nur in der preiswerteren *Evolution Line* verbaut wird. Im professionellen Produktsegment werden nach wie vor *HiDynPlus*-Kompander eingesetzt. Sowohl *HiDynPlus* als auch

⁸Abk.: Ultra High Frequency

⁹„Diversity“-Empfänger besitzen zwei räumlich getrennte Empfangseinheiten, vergleichen ständig zwischen beiden Signalen und verwenden jeweils das besser empfangene.

¹⁰siehe Abschnitt 2.2.2

HDX sind Breitband-Kompander, deren Detektorstufen das Spitzenwert-Verfahren zur Einhüllendenerkennung verwenden.

Im Bereich der professionellen Drahtlos-Mikrofonanlagen gibt es senderseitig zwei grundsätzlich verschiedene Lösungen: Entweder ist der Sender bereits im Handmikrofon integriert (Abbildung 2.4.1), oder ein drahtgebundenes Mikrofon bzw. ein Instrumentenabnehmer ist per Kabel mit einem Taschensender verbunden (Abbildung 2.4.1), in dem die HF-Modulation stattfindet. Auf der Empfängerseite wird dagegen häufig mit Rackeinschub-tauglichen Geräten im 19 Zoll-Format (Abbildung 2.4.1) gearbeitet, die zum Beispiel bei Multikanal-Anlagen problemlos kaskadiert werden können.



Abb. 2.10: Beispiel für Handsender: *Sennheiser SKM 5000*



Abb. 2.11: Beispiel für Taschensender: *Sennheiser SK 5012*

2.4.2 Stand der Technik beim Mitbewerb

Die Recherche nach entsprechenden Produkten des Mitbewerbs führt auf ähnliche Angaben zur Systemdynamik, aber teilweise etwas andere Kompanderverfahren: Der Mitbewerber Shure gibt für seine professionellen Modelle einen Dynamikumfang von mehr



Abb. 2.12: Typischer Empfänger: *Sennheiser EM 3031*

als 100 dB(A) an; bei den neueren Modellen der *ULX*- und *SLX*-Serie kommt dabei das *Audio Reference Companding*-Verfahren [7] zum Einsatz, das mit einem variablen Kompressionsfaktor arbeitet: Nach Auskunft von Shure liegt dieser je nach Eingangspegel zwischen 1 und maximal 5. Der breitbandig arbeitende Kompander verwendet zusätzlich eine Pre-/Deemphasis-Schaltung.

Die Firma Lectrosonics bietet mit dem System *Digital Hybrid Wireless* eine Kombination aus analoger Funkstrecke und DSP-Elementen, die dem Hybrid-Konzept der vorliegenden Untersuchung sehr nahe zu kommen scheint. Allerdings ist in den offiziellen Unterlagen nicht von Kompandersystemen die Rede: „*A proprietary algorithm encodes the digital audio information into an analog format which can be transmitted in a robust manner over an analog FM wireless link.*“¹¹

2.4.3 Probleme der aktuellen Sennheiser-Systeme

Die entscheidende Problematik bei allen Kompandersystemen liegt in der Notwendigkeit, einerseits Störrauschen unterschiedlicher Intensität effektiv zu reduzieren oder sogar für das Ohr weitgehend unhörbar zu machen, andererseits dabei aber die Originaldynamik des Audiosignals zu erhalten und nicht durch diverse Artefakte zu beeinträchtigen.

Einige dieser Artefakte treten bei den aktuellen Systemen immer wieder auf. An erster Stelle ist der sogenannte „Schellenring-Effekt“ zu nennen, der bei typischen Situationen im Bühneneinsatz immer wieder auftritt. Dabei handelt es sich um die Modulation tieffrequenter Signalanteile durch hochfrequente Informationen. Ein Sänger auf der Bühne mit einem Mikrofon in der einen und einem Schellenring in der anderen Hand ist ein typisches Szenario: Das Mikrofon empfängt sehr viele hochfrequente Signalanteile, die vom Schellenring herrühren, und durch die dicht beieinander liegenden hohen Einzelresonanzen der einzelnen Schellen entstehen im Kompander Intermodulationsprodukte, also Differenztöne, die sich im tieferen Frequenzbereich der Gesangsstimme störend bemerkbar machen. Wie alle Verzerrungen gewinnt auch der „Schellenring-Effekt“ mit wachsender Unsymmetrie zwischen Kompressor und Expander an Bedeutung.

Ein nicht-komplementäres Verhalten von Kompandern entsteht jedoch meist ungewollt:

¹¹Zitiert aus [4], S. 23

Durch die Toleranzen der analogen Bauteile, die zum Beispiel bei großen Temperaturdifferenzen ihre Parameter ändern¹², können sich die Kennlinien von Kompressor und Expander verändern, was je nach System zu linearen oder nichtlinearen Verzerrungen führt. Wie in Abschnitt 2.2.1 bereits beschrieben, können aber auch Phasenverzerrungen des Signals, die auf analogen Strecken auftreten, dafür die Ursache sein.

Auf den heutigen Sennheiser-Funkstrecken spielen außerdem Gruppenlaufzeiten eine Rolle. Diese entstehen vor allem durch die Übertragung des Batterie-Ladezustands: In einem für das Audiosignal nicht relevanten, sehr tiefen Frequenzbereich werden digitale Informationen übertragen, die dem Empfänger den Batteriestatus des Senders mitteilen. Bei einem neuartigen digitalen System wäre es möglich, solche Zusatzinformationen in einem anderen, unkritischeren Frequenzbereich zu übertragen, ohne das Spektrum des Audiosignals zu beeinträchtigen.

¹²siehe auch Abschnitt 2.5

2.5 Besonderheiten einer digitalen Realisierung

2.5.1 Vorteile

Bei einem digital realisierten Kompanadersystem, in dem sämtliche Bearbeitungen des Audiosignals durch implementierte Algorithmen auf mathematischer Ebene erfolgen würden, wären zunächst einmal sämtliche Probleme gelöst, die auf die Toleranzen und Parameterschwankungen analoger Bauteile zurückgehen. Die Folge solcher Schwankungen sind nicht exakt komplementär arbeitende Kompressor- und Expander-Einheiten; man spricht hier auch von „Mistracking“. Bereits recht geringe Abweichungen verursachen Verzerrungen im Ausgangssignal des Kompanaders, die das zu übertragende Audiosignal stark beeinträchtigen können.

Parameterschwankungen ergeben sich insbesondere durch besonders hohe Beanspruchung der analogen Schaltungen. Speziell bei hoher Ratio-Einstellung und der damit zusammenhängenden Belastung der Bauteile ist das Thema Langzeitstabilität von großer Bedeutung. Ein noch häufiger auftretendes Problem sind jedoch größere Temperaturdifferenzen zwischen Sender (also der Kompressorstufe) und Empfänger (also der Expanderstufe): Im Bühneneinsatz ist es keine Seltenheit, dass sich der Empfänger hinter der Bühne in einer 10 °C kälteren Umgebung als beispielsweise der Handsender befindet - dies verursacht Probleme durch nicht-komplementäre Arbeitspunkte von Kompressor und Expander.

Auch die angesprochenen Probleme durch nicht-konstante Gruppenlaufzeiten ließen sich mit einem neuartigen digitalen System einfacher handhaben: Hier wäre es möglich, solche Zusatzinformationen in einem anderen, unkritischeren Frequenzbereich zu übertragen und das Audiosignal dennoch nicht zu beeinträchtigen.

Durch nicht identische Aussteuerungen der A/D- beziehungsweise D/A-Wandler bestünde in gewisser Weise zwar auch bei einem Hybridsystem die Gefahr, dass Kompressor und Expander nicht komplementär arbeiten; allerdings wäre durch die Digitalisierung der kritischen Bauelemente das Problem wesentlich einfacher in den Griff zu bekommen als bei reinen analogen Schaltungen.

Ein nicht optimal angepasstes zeitliches Regelverhalten des Kompanadersystems führt auch bei digitalen Systemen zu Rauschmodulationen und sonstigen Artefakten. Allerdings lassen sich die entsprechenden Parameter auf der digitalen Ebene wesentlich leichter einstellen, und es ist sogar mit relativ geringem Aufwand möglich, bequem umschaltbare Presets mit verschiedenen Einstellungen für unterschiedliche Arten von Signalen und Empfangsbedingungen zu implementieren.

2.5.2 Nachteile

Aber auch die Nachteile digitaler Komandersysteme sollen nicht verschwiegen werden: Wie bei allen digitalen Systemen entstehen auch hier Laufzeitdifferenzen zwischen Eingangs- und Ausgangssignal. In einem Hybridsystem mit digitalem Komander und analoger Funkstrecke müssten im Sender und im Empfänger jeweils ein A/D- und ein D/A-Wandler platziert werden, die ebenso wie die Frequenzband-Filter in einem digitalen Multiband-Komander unvermeidliche Latenzen zur Folge hätten. Diese würden sich zu der ohnehin existierenden Laufzeitdifferenz durch die digitalen Kompressor- und Expander-Algorithmen addieren. Gerade im Bühneneinsatz, wo mit In-Ear- oder anderen Monitoring-Systemen für die Musiker gearbeitet wird, können Laufzeitdifferenzen allerdings äußerst problematisch sein: Eine entsprechende Untersuchung [5], in deren Rahmen auch praktische Versuche mit Musikern durchgeführt wurden, kommt zu dem Ergebnis, dass zwar erst eine Latenz von 10 Millisekunden zu musikalischen Rhythmus-Problemen und damit zu einer Veränderung des Spielverhaltens führen kann. Wesentlich problematischer ist allerdings der zweite Effekt, der sich schon bei weitaus geringeren Latenzen einstellt: Die Mischung von Originalsignal und verzögertem Signal, wie es bei diversen Monitoring-Systemen vorkommt, führt zu Kammfiltereffekten, deren Frequenz-Auslöschungen teilweise starke Klangverfärbungen hervorrufen können.

Ein weiteres Problem ist die hohe Stromaufnahme einer solchen Schaltung. Derzeit wäre ein Vielfaches der bisherigen Batterie-Bestückung notwendig, um im Sender dieselbe Akkulaufzeit zu erzielen wie bei den bisherigen rein analogen Systemen. Angesichts der Fortschritte im Bereich der Batterie-Technik scheint dieses Problem aber auf mittlere Sicht lösbar.

3 Vorüberlegungen

3.1 Zum Konzept der Hörvergleiche

Die vorhandene Simulationssoftware *CompExSimPlus* bietet eine breite Palette von Einstellungsmöglichkeiten und Parametern, die allesamt das klangliche Verhalten des Kompandersystems mehr oder weniger stark beeinflussen. Eine Kompanderabstimmung allein mit Hilfe von Messgeräten wäre weder praktikabel noch sinnvoll; nicht alle klanglich wahrnehmbaren Phänomene lassen sich messtechnisch anschaulich erfassen und darstellen. Diese Problematik wird im Verlaufe zahlreicher Diskussionen sowohl im Bereich der professionellen wie auch der Consumer-Audiotechnik immer wieder deutlich. Ganz bewusst setzt diese Untersuchung auf eine ausschließlich klangliche Bewertung der verschiedenen Parameter, die bei einem digital realisierten Kompandersystem zur Disposition stehen. Die Vielzahl dieser Parameter und die verschiedenen Anwendungsbereiche der drahtlosen Mikrofontechnik erfordern umfassende Hörvergleiche, in deren Verlauf die Eignung der verschiedenen Verfahren bewertet wird.

Auditive Bewertungen jeglicher Art sind allerdings grundsätzlich sehr subjektiv geprägt. Die gehörmäßige Vorbildung sowie die Schulung und Sensibilisierung des Gehörs auf bestimmte Kriterien spielen eine ebenso große Rolle wie die unterschiedlichen Testumgebungen. Um dennoch ein repräsentatives und damit möglichst objektives Ergebnis zu erzielen, basieren die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Hörvergleiche auf einem zweigeteilten Konzept:

Im ersten Abschnitt wurden zunächst verschiedene Audiomaterialien erzeugt und auf ihre Eignung für einen Kompander-Hörvergleich untersucht. Die Vielzahl der Parameter multipliziert mit der Anzahl der verschiedenen Hörbeispiele hätte Hunderte von Kombinationen ermöglicht, deren Vergleich weder mit vertretbarem Aufwand durchführbar noch sinnvoll gewesen wäre. Daher erfolgte zunächst mit Hilfe der ausgewählten Audio-beispiele eine erste Sichtung und Einordnung der verschiedenen Parameter nach ihrer klanglichen Relevanz und schließlich eine Vorauswahl geeigneter Einstellungen.

Ein ergänzender Hörvergleich am Erich-Thienhaus-Institut der Hochschule für Musik Detmold bildete den zweiten Abschnitt der klanglichen Untersuchungen. Hier wurde eine vertiefende Auswahl zwischen den im ersten Abschnitt erarbeiteten Kompandereinstellungen zur Disposition gestellt und so die bereits grob definierten Parameter weiter eingegrenzt und optimiert.

Wie im nächsten Kapitel näher beschrieben wird, bietet die Simulationssoftware die Möglichkeit, sowohl eine reale Funkstrecke einzuschleifen als auch das Störuschen mit variablem Pegel zu simulieren. Um dem praktischen Einsatz und den Störungen im Alltag möglichst nahe zu kommen, wurde bereits im Vorfeld der Untersuchungen sichergestellt, dass das Software-generierte Störuschen weitestgehend realistische Bedingungen

schafft. In der Tat ist nur schwer ein Unterschied festzustellen und das simulierte Störrauschen daher bedenkenlos einsetzbar. Im Gegenteil bietet die Simulationsumgebung im Gegensatz zur realen Funkstrecke sogar die Möglichkeit einer wesentlich feineren Abstufung des Rauschpegels, um unterschiedliche Empfangsbedingungen simulieren zu können. Eventuelle Probleme, die sich bei heutigen Sennheiser-Funkstrecken durch nicht konstante Gruppenlaufzeiten zeigen, können hingegen mit einer simulierten Funkstrecke nicht nachgebildet werden. Hinzu kamen teilweise große Software-Probleme beim Betrieb der externen Funkstrecke, die mit dem Kompander-internen Übersteuerungsverhalten zusammenhängen und deren genaue Ursache sich bis zuletzt nicht vollständig klären ließ. Dennoch basieren die im ersten Abschnitt erzielten Ergebnisse ungefähr zu gleichen Teilen auf simuliertem Störrauschen und realem Rauschen einer externen Funkstrecke, deren Aufbau ebenfalls im nächsten Kapitel dargestellt ist.

Auch wenn eine absolut praxisnahe Simulation selbstverständlich erwünscht war und im Falle der ausgewählten Hörbeispiele und deren Manipulation auch gewährleistet wurde, mussten in Bezug auf die Abhörbedingungen in diesem Punkt gewisse Einschränkungen hingenommen werden. Die klanglichen Vergleiche wurden zum größten Teil entweder mit hochwertigen elektrostatischen Kopfhörern oder professionellen Studio-Lautsprechern in akustisch unproblematischen Räumen durchgeführt. Dies entspricht natürlich insofern nicht der Realität, als dass in typischen Einsatzbereichen für drahtlose Mikrofonsysteme meist sogenannte PA¹³-Beschallungsanlagen verwendet werden, deren akustisches Auflösungsvermögen gewöhnlich auf einem weitaus niedrigeren Niveau liegt, deren Schalldruckpegel dagegen die im Studio gebräuchlichen Werte häufig deutlich überschreiten. Hinzu kommen akustische Unwägbarkeiten oft sehr großer Räume, die bei professionellen Beschallungen selbstverständlich mit einkalkuliert werden müssen, im Studio-Bereich jedoch gewöhnlich keine Rolle spielen.

Eine systematische klangliche Untersuchung unter solchen „PA-Bedingungen“ ist im Rahmen einer Diplomarbeit nicht durchführbar. Der Verfasser sieht hierin allerdings keinerlei Einschränkung für die Gültigkeit und Verwendbarkeit der Testergebnisse: Gerade durch hochwertige Technik und professionelle Abhörbedingungen wurde gewährleistet, dass störende Klanganteile in jedem Fall dem Kompandersystem zuzuschreiben sind. Eine in jeder Hinsicht möglichst neutrale und „idealisierte“ Abhörkette ist daher im Gegenteil ausdrücklich positiv zu bewerten.

¹³Abk.: public address

3.2 Psychoakustische Aspekte

Die Psychoakustik beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen den objektiven physikalischen Eigenschaften eines akustischen Signals und den daraus resultierenden Hörempfindungen. Das menschliche Gehör zeichnet sich hier durch einige Besonderheiten aus, die in vielen Fällen bewusst ausgenutzt werden. Im Bereich der Audiodatenreduktion beispielsweise machen sich zahlreiche Kodierverfahren psychoakustische Phänomene zunutze und eliminieren Signalanteile, die vom menschlichen Gehör ohnehin nicht wahrgenommen würden (*Perceptual Audio Coding*). Auch im Zusammenhang mit Kompanadersystemen sind psychoakustische Erkenntnisse zu bedenken: Vor allem bei der Wahl geeigneter zeitlicher Regelgrößen spielen das zeitliche Auflösungsvermögen des menschlichen Ohres beziehungsweise die entsprechende Auswertung der auditiven Informationen im Gehirn eine wichtige Rolle. Daher soll im Folgenden kurz auf charakteristische und für die Erarbeitung geeigneter Kompanader-Parameter relevante psychoakustische Aspekte eingegangen werden.

Analoge Übertragungstrecken ohne Kompanadersysteme zeichnen sich durch einen konstanten Rauschteppich aus, der bei FM-Funkstrecken zum Beispiel bei circa 60 dB unterhalb der Vollaussteuerungsgrenze liegt. Dieses Rauschen wird bei sehr leisen Signalen, die nur unwesentlich oberhalb des Rauschpegels oder niedriger liegen, deutlich hörbar. Anders verhält es sich jedoch bei lauten Passagen: Auf einem geeigneten Messgerät wird das Rauschen neben dem lauten Signal nach wie vor dargestellt; das menschliche Gehör jedoch würde gewöhnlich nur noch das laute Signal wahrnehmen, obwohl sich der Rauschpegel nicht geändert hat. Dieses Phänomen wird als *Verdeckung* oder *Maskierung* bezeichnet und ist dadurch zu erklären, dass das menschliche Gehör eine variable *Hörschwelle* besitzt: Die Empfindlichkeit des Hörsinns wird in gewissem Maße auf die jeweilige Lautstärke angepasst; nur so ist die Wahrnehmung und Verarbeitung sowohl extrem geringer als auch extrem hoher Schalldrücke möglich. Die Pegeldifferenz, ab der ein leises Signal durch ein lautes Signal maskiert wird, definiert die sogenannte *Mithörschwelle*. Diese ist stark frequenzabhängig; beispielsweise lassen sich hohe Frequenzen durch tiefe wesentlich leichter verdecken als umgekehrt.

Im Kontext mit Kompanadersystemen ist dieses Maskierungs-Phänomen vor allem dann interessant, wenn es um das Maß der nötigen Rauschunterdrückung geht, ab welcher das Rauschen nicht mehr wahrnehmbar ist. Durch einen Kompressionsfaktor von 2 bei extrem niedrigem Threshold ermöglicht das aktuelle Sennheiser-Kompanadersystem *HiDynPlus* beispielsweise eine Rauschunterdrückung von circa 50 bis 60 dB, wodurch die nutzbare Dynamik auf bis zu 115 dB erweitert wird.

Die Maskierungs-Effekte treten jedoch nicht nur bei gleichzeitig angebotenen Signalen auf (*simultane Maskierung*), sondern auch bei einigem Zeitversatz zwischen beiden Signalen (*temporale Maskierung*): Ein sehr leises Signal kurz nach einer lauten Passage wird erst nach einer gewissen Zeit wahrgenommen, da das menschliche Gehör eine gewisse „Erholungszeit“ benötigt, bis es wieder die volle Empfindlichkeit aufweist. Dieses

Phänomen heißt *Nachverdeckung* oder englisch *Postmasking* und hat im Zusammenhang mit Kompandersystemen bei der Definition geeigneter Zeitkonstanten unmittelbare Bedeutung¹⁴. Denn die Modulation des Rauschens mit dem aktuellen Signal ist ein prinzipielles Problem von Kompandern, das nur durch die vorteilhafte Ausnutzung des Verdeckungseffektes reduziert werden kann. Hörbare Rauschfahnen können nur entstehen, wenn die zeitliche Verdeckungsschwelle durch die Release-Zeit des Kompanders überschritten wird. Zwicker und Fastl [11] haben herausgefunden, dass diese Grenze bei über 100, in einigen Fällen sogar bei bis zu 200 Millisekunden liegen kann, wie Abbildung 3.2 veranschaulicht. Die temporale ist wie die simultane Maskierung sehr frequenzabhängig, weshalb hier keine allgemein gültige Festlegung erfolgen kann: Die bei Kompandersystemen zu wählende exakte Release-Zeit ist von der spektralen Zusammensetzung und dem Dynamikverlauf des jeweiligen Audiosignals abhängig.

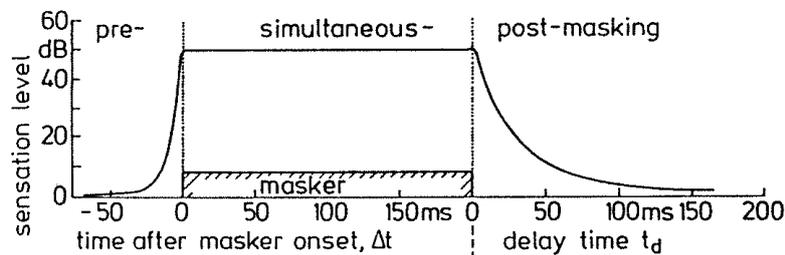


Abb. 3.1: Zeitbereiche, in den Vorverdeckung, simultane Verdeckung und Nachverdeckung auftreten können (Quelle: [11])

¹⁴Für Kompander nicht relevant, aber nicht weniger interessant ist die Tatsache, dass dies auch umgekehrt funktioniert: Ein sehr leises Signal, dem nach kurzer Zeit eine sehr laute Passage folgt, wird vom menschlichen Gehör unter Umständen ebenfalls nicht wahrgenommen (*Vorverdeckung* oder *Premasking*).

4 Klangvergleich verschiedener digitaler Algorithmen

4.1 Auswahl von Audio-Testbeispielen

Die klangliche Abstimmung des digitalen Kompanzers orientiert sich bewusst an den typischen Einsatzbereichen für drahtlose Mikrofonsysteme. Diese wiederum liegen fast ausschließlich im Bereich von Live-Bühnenveranstaltungen oder der sogenannten Elektronischen Berichterstattung (EB)¹⁵. Der Einsatz ist daher auf relativ wenige Anwendungsbereiche begrenzt: Die Abnahme von „fest installierten“ Instrumenten wie Schlagzeug oder Klavier ist im Bereich der drahtlosen Mikrofonübertragungstechnik ebenso selten wie entferntere Mikrofonierungen für verschiedene Instrumente gleichzeitig, wie es besonders im Bereich der Klassik-Aufnahmetechnik gängig ist. Statt dessen wird meist eine ausgesprochen nahe Mikrofonierung eingesetzt, um das Übersprechen von anderen Schallquellen möglichst gering zu halten. Außer im Filmbereich, wo teilweise ebenfalls mit drahtloser Tontechnik gearbeitet wird, ist die Übertragung zudem auf monofone Anwendungen begrenzt, weshalb auch das im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehende Simulationsprogramm ausschließlich Mono-Signale verarbeitet.

Um sowohl die Anforderungen des Live-Einsatzes als auch die des EB-Bereiches abzudecken, wurden verschiedene Audio-Materialien gesichtet und deren Eignung beurteilt. Die Wahl fiel schließlich auf sechs verschiedene Signale, mit deren Hilfe das klangliche Verhalten der Kompanzersysteme untersucht wurde:

- Gesang männlich: Live-Bühne, Hintergrundgeräusche durch andere Instrumente
- Gesang weiblich: Live-Bühne, lauter Schellenring und Hintergrundgeräusche durch andere Instrumente
- Sprache männlich: trocker Raum, ohne Hintergrundgeräusche
- Sprache weiblich: trocker Raum, ohne Hintergrundgeräusche
- Akustikgitarre: Live-Bühne, DI-Box
- E-Bass: Live-Bühne, DI-Box

Die Aufnahme dieser Beispiele ist ausschließlich mit kabelgebundener Technik erfolgt, um Funkstrecken-Beeinflussungen erst im Nachhinein simulieren zu können. Abgesehen von vereinzelter Trittschallfilterung wurde zugunsten eines möglichst „naturgetreuen“ Klanges auf jegliche Manipulation der Signale (Equalizer, Kompressoren o. ä.) verzichtet, um sicherzustellen, dass eventuelle klangliche Beeinträchtigungen später eindeutig der

¹⁵Der englische Ausdruck „Electronic News Gathering“ (ENG) ist ebenfalls verbreitet.

Funkstrecke und dem Komandersystem zuzuschreiben sind und nicht etwa bereits dem Originalsignal entstammen.

Wie in Kapitel 2 bereits angedeutet, sind Hintergrundgeräusche im Zusammenhang mit Komandersystemen oft problematisch: Während ein kabelgebundenes Mikrofon alle Signale pegelgetreu überträgt, unterscheidet die Rauschunterdrückung selbstverständlich nicht zwischen Störrauschen und leisen Hintergrundinformationen. Die hintergründigen Schallanteile werden daher, da sie im Pegel deutlich unterhalb der Vollaussteuerung liegen, häufig mit dem vordergründigen Hauptsignal moduliert, was zum bereits erwähnten charakteristischen „Pumpen“ führen kann. In der Praxis sind Komandersysteme daher oftmals weniger durch den Klang des vordergründigen Hauptsignals als vielmehr durch die unnatürlichen Pegel-Veränderungen der Hintergrundgeräusche zu identifizieren. Weil sich solches Material damit gut für die klangliche Beurteilung von Komandersystemen eignet, enthalten zwei der oben genannten Audio-Beispiele deutlich wahrnehmbare Hintergrundgeräusche, entweder durch Übersprechen anderer Instrumente oder die Beschallungsanlage auf der Bühne.

Ebenfalls ausführlich geschildert wurde das Problem des „Schellenringeffekts“, der durch den sogenannten dynamischen Trackingfehler entsteht. Um hier ebenfalls realistische Bedingungen für die digitalen Komandersysteme zu schaffen, wurde das Beispiel „Gesang weiblich“ künstlich mit einem rhythmischen Schellenring-Signal unterlegt, um die Anfälligkeit der jeweiligen Systeme in dieser Richtung zu untersuchen.

Neben dem Bereich „Sprache und Gesang“, der in dieser Untersuchung sowohl weibliche als auch männliche Stimmen beinhaltet, beschränkt sich der Einsatz von drahtlosen Mikrofonen im Instrumentalbereich hauptsächlich auf tragbare Saiteninstrumente wie Gitarre oder E-Bass. Zwar wurde auch mit dem Signal eines Geigen-Ansteckmikrofons gearbeitet, dieses Signal war jedoch für verschiedene Kompandereinstellungen ausgesprochen unkritisch und wurde, um die Anzahl der verschiedenen Beispiele möglichst gering zu halten, nicht weiter verwendet. Die Instrumente E-Bass und Akustikgitarre sind hingegen mit jeweils einem Klangbeispiel vertreten und stellen mit ihren äußerst impulshaften, sehr dynamischen Signalen hohe Anforderungen an die Komandersysteme.

Alle im Rahmen der Klangvergleiche verwendeten Audio-Beispiele sind auf der beiliegenden CD-ROM enthalten, deren Inhalt in Anhang A aufgelistet ist.

4.2 Beschreibung der Simulationsumgebung

Die klanglichen Untersuchungen der verschiedenen Kompandersysteme und -parameter wurden mit Hilfe einer Softwareumgebung namens *CompExSim*¹⁶ beziehungsweise deren Weiterentwicklung *CompExSimPlus* durchgeführt, welche als Ergebnis der Diplomarbeit von J. R. ter Haseborg entstanden ist [8] und nach einigen Weiterentwicklungen und Fehlerkorrekturen nunmehr in der Version 2.2.1 (Release 2004-07-02) vorliegt. Die Software ermöglicht die Simulation von Breitband- oder 4-Band-Kompandern mit konstanter Bandbreite. Dabei kann sowohl eine vorliegende Audio-Datei im wav-Format geladen als auch ein Signal über die Schnittstellen der PC-Soundkarte eingespeist werden.

Anschließend lassen sich verschiedene Kompandersysteme konfigurieren; die dabei wesentlichen beiden Konfigurations-Fenster zeigen Abbildung 4.2 und 4.2.

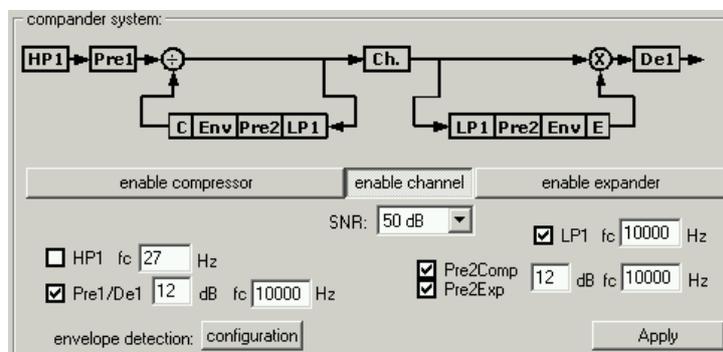


Abb. 4.1: *CompExSimPlus* – Kompander-Konfiguration

Abb. 4.2: *CompExSimPlus* – Parameter-Einstellungen

¹⁶Compressor Expander Simulation

Nach Auswahl des Verfahrens zur Einhüllendenermittlung erfolgt hier die Kennlinien-Definition sowie die Wahl der verschiedenen Zeitkonstanten; diese Parameter wurden in Kapitel 2 beschrieben. Darüber hinaus lässt sich grundsätzlich ein Breitband- oder ein 4-Band-Verfahren auswählen; der 4-Band-Betrieb ermöglicht die getrennte Wahl der Kennlinien- und Zeit-Parameter für jedes einzelne Frequenzband. Die Breite der Teilbänder ist hingegen festgelegt: Das niedrigste Frequenzband reicht bis 215 Hz, das zweite bis 1450 Hz, das dritte bis 4800 Hz, und oberhalb davon greifen schließlich die Einstellungen für das vierte Band. Diese Trennfrequenzen orientieren sich am *Telecom c4*-Kompander, der an anderer Stelle bereits erwähnt wurde¹⁷.

Kompressor- und Expanderstufe sind in *CompExSimPlus* getrennt schaltbar, um die Wirkungsweise beider Kompander-Hälften einzeln hörbar zu machen. Die Parameter sind allerdings gekoppelt, so dass Kompressor und Expander stets exakt komplementär arbeiten. Die Funkstrecke dazwischen und die damit verbundenen Rausch-Störungen lassen sich auf zwei verschiedene Arten simulieren: Entweder generiert die Software ein weißes Rauschen mit Gaußscher Amplitudendichteverteilung, dessen Pegel zwischen -5 dB und -90 dB unter Vollaussteuerung in 5 dB-Schritten einstellbar ist, oder es lässt sich über das Audio-Interface des Rechners eine reale Funkstrecke einschleifen, wie Abbildung 4.2 veranschaulicht.

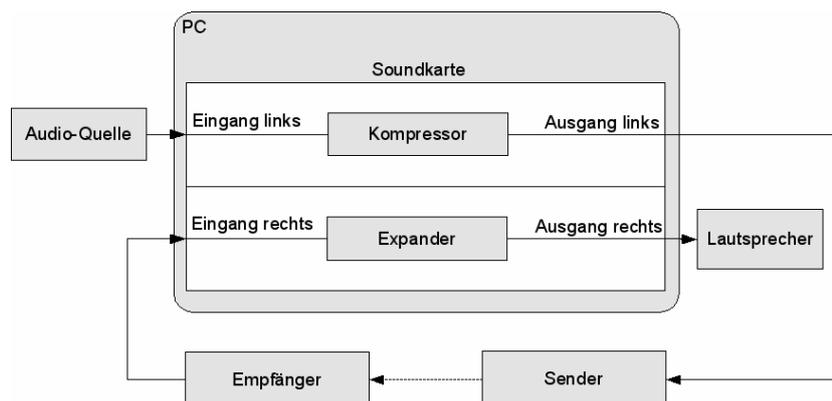


Abb. 4.3: *CompExSimPlus* – Signalweg bei Einschleifung einer externen Funkstrecke (Quelle: [8])

Schließlich stehen noch zusätzliche Filter zur Auswahl, welche eine Emphasis-Schaltung entweder vor dem VCA oder im Regelzweig des Kompanders simulieren oder das Signal in beide Richtungen bandbegrenzen können. Die Emphasis-Filter sind im 4-Band-Modus deaktiviert, was aus den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Gründen durchaus Sinn macht.

Die Arbeitsweise mit eingeschleifter externer Funkstrecke verdient besondere Aufmerksamkeit, denn in diesem Fall enthält die Kette insgesamt zwei A/D- und zwei D/A-Wandler sowie Sender- und Empfänger-Schaltungen. Neben dem Problem der unver-

¹⁷siehe Abschnitt 2.2.1

meidbaren Latenz, das in Kapitel 2 bereits angesprochen wurde, ist aus zwei Gründen unbedingt auf eine korrekte Pegel-Einmessung aller Komponenten der Kette zu achten: Zunächst müssen die einzelnen A/D- und D/A-Wandlungsstufen, um möglichst rauscharm zu arbeiten, alle jeweils optimal angesteuert werden. Erfolgt die dafür erforderliche Pegelanpassung jedoch durch minderwertige analoge Verstärker, wird wiederum zusätzliches Rauschen produziert, das vom Komandersystem selbstverständlich nicht unterdrückt werden kann, da es sowohl vor als auch nach der Funkstrecke entsteht. Zweitens besteht durch die unterschiedlichen Arbeitspegel der verschiedenen Wandlerstufen die Gefahr, dass sich der Signalpegel vor der Expanderstufe vom Pegel hinter dem Kompressor unterscheidet. Die Folge wäre eine einseitig verschobene Kennlinie und damit in den meisten Fällen eine nichtkomplementäre Arbeitsweise des Komandersystems.

4.3 1. Abschnitt: Klangliche Vorauswahl

Die Erfassung und grundsätzliche Bewertung aller *CompExSimPlus*-Parameter und die klangliche Vorauswahl erfolgte teilweise mit Hilfe von Software-generiertem Störrauschen und teilweise über eine reale Funkstrecke. In beiden Fällen wurde die Intensität des Rauschens bzw. die simulierte Empfangsqualität immer wieder in beide Richtungen variiert. Zur klanglichen Beurteilung wurden sowohl Kopfhörer als auch Lautsprecher verwendet. Zunächst galt es nun zu klären, welche Kompander-Parameter sich klanglich am deutlichsten auswirken. Dazu wurde zunächst eine Einschätzung der Multiband-Fähigkeit von *CompExSimPlus* vorgenommen und die klanglichen Ergebnisse mit verschiedenen Breitband-Einstellungen verglichen. Anschließend fand eine erste Bewertung und Vorauswahl der sechs zur Verfügung stehenden Einhüllendenermittlungsverfahren statt. Um hier möglichst starke Artefakte zu provozieren und damit die Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren klanglich zu verdeutlichen, wurden in dieser Vorauswahl-Phase vor allem Breitband-Kompander verwendet und das Störrauschen relativ stark eingestellt. Auf diese Art und Weise ließ sich die klangliche Relevanz auch der anderen Parameter am deutlichsten beurteilen.

Des weiteren wurde geprüft, wie die verschiedenen Artefakte mit dem jeweiligen Audio-material zusammenhängen und welche Audiobeispiele durch ihre Signalstruktur besonderer Aufmerksamkeit in Bezug auf bestimmte Parameter bedürfen. Im Zuge dieser Vergleiche kristallisierten sich hier sowohl Audiobeispiele heraus, die für Kompandersysteme besonders kritisch sind und bei suboptimalen Kompandereinstellungen sehr deutliche Artefakte produzieren, als auch weniger kritische Beispiele, bei denen der Unterschied zwischen verschiedenen Kompander-Parametern recht gering ausfällt. Auf diese Art und Weise wurde auch im Falle der Audiobeispiele eine Vorauswahl getroffen, so dass sich die folgenden Vergleiche im weiteren Verlauf wesentlich einfacher handhaben ließen.

Während der Vorauswahl etablierten sich auch die Kriterien, nach denen sich Kompandersysteme am besten beurteilen lassen. Diese bildeten die Grundlage für die weiteren Untersuchungen.

4.4 2. Abschnitt: Verifizierung und Feinauswahl

Der zweite Abschnitt der klanglichen Untersuchungen diente der weiteren Auswahl und Feinabstimmung der oben bereits vorausgewählten Verfahren und Parameter. Darüber hinaus galt es, bereits im Vorfeld gewonnene Erkenntnisse mit Hilfe mehrerer Hörprobanden zu verifizieren. Dazu wurde ein systematischer Hörvergleich mit Studierenden des Tonmeister-Studiengangs am Erich-Thienhaus-Institut der Hochschule für Musik Detmold durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Durchführung der Hörvergleiche sind im Folgenden dokumentiert.

4.4.1 Versuchsaufbau

Um die Handhabung im Rahmen des Hörvergleichs zu erleichtern, wurde das gesamte Audiotestmaterial bereits im Vorfeld erzeugt. Hierbei wurde die Fähigkeit der Simulationssoftware genutzt, die fertig komponierten Signale nicht nur über den Ausgang des Audio-Interface auszugeben, sondern statt dessen in eine neue wav-Datei zu schreiben. Das Störrauschen wurde ebenfalls Software-intern hinzugerechnet¹⁸; so konnten verschiedene Rauschintensitäten bzw. Empfangsbedingungen problemlos und vor allem exakt reproduzierbar simuliert werden. Die auf diese Art und Weise erzeugten Klänge wurden auf eine Audio-CD gebrannt, so dass sämtliche während des Hörvergleiches verwendeten Klänge vom Tonträger abgespielt werden konnten.

Der CD-Spieler Marantz PMD321 fungierte als Laufwerk und war digital mit dem D/A-Wandler DAC 3 der Firma Cambridge Audio verbunden. Vom Wandler wurde das Signal direkt dem zugehörigen Verstärker (Sennheiser HEV 70) des elektrostatischen Kopfhörers (Sennheiser HE 60) zugeführt. Alternativ war auch eine Wiedergabe über Lautsprecher eingerichtet: Hinter dem Wandler regelte ein Revox C 279-Mischpult den Abhörpegel, der dann über symmetrische Verbindungen direkt den aktiven Studiomonitoren (Geithain RL 904) zugeführt wurde.

4.4.2 Praktische Durchführung

Im Rahmen des Hörvergleiches wurden insgesamt 46 Audio-Beispiele vorgespielt, die jeweils paarweise einander gegenüber gestellt waren. Bei allen 23 auf diese Weise entstandenen Beispiel-Paaren sollte entsprechend den Hörerfahrungen des ersten Abschnitts eine Bewertung nach vier verschiedenen Kriterien erfolgen. Die Probanden mussten hierbei eine einfache Bewertung nach dem Muster „besser oder schlechter“ vornehmen. Eine Sensibilisierung auf die typischen Kompander-Artefakte wurde bewusst nicht vorgenommen, war aber wegen des allen Teilnehmern bekannten Themas der Untersuchung und durch die vorgegebenen Bewertungskriterien in gewisser Weise automatisch gegeben.

¹⁸Die weitestgehende Identität von künstlich erzeugtem Störrauschen und realem Rauschen einer FM-Funkstrecke war dabei gewährleistet (siehe Kapitel 3).

Um der begrenzten Konzentrationsfähigkeit der Teilnehmer Rechnung zu tragen, wurde die Anzahl der verschiedenen Audiomaterialien auf drei reduziert: 26 der insgesamt 46 Beispiele verwendeten das Beispiel E-Bass, welches sich im Verlauf des ersten Vergleichsabschnitts als besonders gut geeignet erwiesen hatte; die Impulshaftigkeit der Saiten verursachte bei suboptimalen Kommandereinstellungen recht deutliche Verzerrungen, und die vielen plötzlich abgedämpften Saitenschwingungen ließen eventuelle Rauschmodulationen leicht hörbar werden. Der Rest der verwendeten Vergleichsbeispiele teilte sich auf in das Beispiel „Sprache männlich“ und „Gesang weiblich“. All diese Beispiele wurden mit zahlreichen verschiedenen Kommandersystemen bearbeitet und einander so gegenübergestellt, dass nach Auswertung der Ergebnisse später möglichst präzise Aussagen bezüglich der Eignung bestimmter Parameter-Einstellungen getroffen werden konnten. Dabei wurden die klanglichen Auswirkungen aller relevanten Kommander-Parameter getestet. Zusätzlich wurden einzelne Beispiele mit verschiedenen DSP-Effekten bearbeitet, um zu untersuchen, ob und inwiefern auf diese Art und Weise eine subjektive Klangverbesserung eines kommandierten Signals möglich ist. Die entsprechenden Hintergründe werden im nächsten Abschnitt genauer erläutert.

4.5 Zusätzliche Beeinflussung durch DSP-Effekte

Im Verlauf der klanglichen Untersuchungen der verschiedenen Kompandersysteme entstand die Idee, ergänzend zu kommandertechnischen Parametern ebenfalls zu untersuchen, ob und inwiefern verschiedene DSP¹⁹-Effekte das Audiosignal subjektiv verbessern können. Dafür wurde mit Kompressoren, frequenzgesteuerten Obertongeneratoren sowie frequenzgesteuerten Kompressionsalgorithmen gearbeitet. Die so bearbeiteten Audiosignale wurden sowohl im ersten Vorauswahl-Abschnitt der Hörvergleiche als auch im zweiten Abschnitt, dem Hörvergleich mit mehreren Probanden, verwendet und klanglich beurteilt. Die Probanden des Hörvergleichs wurden über die Verwendung dieser DSP-Effekte bewusst nicht in Kenntnis gesetzt; den Teilnehmern war lediglich bekannt, dass verschiedene Kompander-Einstellungen zur Auswahl gestellt wurden.

4.5.1 Kompression

Vor allem im Bereich der Populärmusik ist der Einsatz von Kompressoren sehr verbreitet. Ein Kompressor verringert die Signaldynamik, indem er leise Pegel anhebt und laute absenkt. Durch die anschließende Anhebung des gesamten Signals („make-up gain“) erhöht sich die subjektive Gesamt-Lautheit, und die Musik wirkt gewöhnlich „druckvoller“ und direkter.

Im Rahmen der Hörvergleiche wurde mit Hilfe eines Breitband-Kompressors das Signal ab einem Threshold von -10 dB um den Faktor 2 komprimiert; dadurch konnte der Gesamtpegel des Signals über die „Makeup-Gain“-Regelung um ca. 2 dB angehoben werden. Da besonders im A/B-Vergleich zweier Beispiele gewöhnlich automatisch das lautere als besser klingend bewertet wird, musste anschließend für den Vergleich mit einem unkomprimierten Beispiel eine Angleichung auf gleiche Lautheit vorgenommen werden.

4.5.2 Frequenzgesteuerte Obertongenerierung

Neben Equalizern, die nach einer definierten Kennlinie das gesamte Signal in bestimmten Frequenzbereichen anheben oder absenken, gibt es verschiedene DSP-Algorithmen, die zum vorhandenen Signal neue, eigentlich nicht vorhandene hochfrequente Anteile generieren und hinzuaddieren. Da die Klangfarbe eines Signals durch seine Obertöne entsteht, ist es denkbar, dass sich gerade bei stark komprimierten Signalen, deren Klang erfahrungsgemäß etwas dumpfer wird, der Klang positiv beeinflussen lässt. Für Geräte und Softwarelösungen, die solche Algorithmen verwenden, sind je nach Hersteller und genauem Verfahren Begriffe wie *Exciter*, *Enhancer* oder *Spectralizer* gebräuchlich. Im Rahmen der vorliegenden Hörvergleiche wurde mit einem Software-Plugin gearbeitet,

¹⁹Digital Signal Processing

das dem vorliegenden Signal Obertöne sowohl gerader (k_2) als auch ungerader Ordnung (k_3) hinzufügen konnte.

4.5.3 Frequenzgesteuerte Kompression

Darüber hinaus wurde mit DSP-Effekten experimentiert, die auf dem Prinzip einer frequenzgesteuerten Kompression beruhen, wie beispielsweise sogenannte *DeHisser* oder *DeEsser*. Diese dienen gewöhnlich der Beseitigung von gleichmäßigem, geringpegeligem Störgeräusch, wie es im Studiobereich typischerweise von minderwertigen Mikrofon-Vorverstärkern oder A/D-Wandlern verursacht wird, oder der Entfernung von überzeichneten hochfrequenten, „zischelnden“ Anteilen bei Sprachaufnahmen.

5 Auswertung

5.1 Ergebnisse der Vorauswahl

Im Rahmen der Vorauswahl erfolgte zunächst eine Bewertung des Multiband-Prinzips gegenüber dem Breitband-Verfahren. Bei allen Audio-Beispielen war das Ergebnis deutlich: Auch ohne angepasste Zeitkonstanten und unabhängig vom gewählten Einhüllendenverfahren war das klangliche Resultat mit einem Multibandkompander besser als bei einem Breitbandkompander. Die Rauschunterdrückung arbeitete bei gleichem Kompressionsfaktor und Threshold wesentlich effektiver, und es entstanden deutlich weniger Artefakte. Da Attack- und Release-Werte bei den ersten Vergleichen in allen vier Bändern identisch eingestellt waren und hier noch keinerlei Optimierung erfolgt war, scheint das Multibandsystem also vor allem durch seine Fähigkeit der Band-getrennten Dynamikregelung klangliche Vorteile zu bringen. Aufgrund der vergleichsweise schlechten Resultate des Breitbandkompanders kam daher für die folgenden Hörvergleiche fast ausschließlich das von *CompExSimPlus* angebotene 4-Band-Verfahren zur Anwendung.

Auch die sechs zur Verfügung stehenden Einhüllendenermittlungsverfahren kristallisierten sich recht früh als besonders klangprägend heraus. Relativ unabhängig von Kennlinien-definierenden Parametern und Zeitkonstanten zeigten alle Einhüllendenermittlungsverfahren charakteristische klangliche Eigenheiten, die je nach Audio-Material unterschiedlich stark auffielen. Unter diesen Verfahren wurde daher schon während des ersten Abschnitts der Hörvergleiche eine Vorauswahl getroffen.

Die derzeitigen Kompandersysteme der Firma Sennheiser, *HiDynPlus* und *HDX*, arbeiten wie erwähnt nach dem Spitzenwert-Verfahren zur Einhüllendenermittlung, weshalb dieses Verfahren als erstes beurteilt wurde. Ab einem bestimmten Rauschpegel zeigten sich hier besonders bei impulshaften Musik- und Sprachsignalen deutliche Rauschfahnen, die zwar durch besser angepasste Release-Zeiten verringert, jedoch nicht komplett eliminiert werden konnten. Die Klangqualität des reinen Audiosignals war jedoch sehr gut und bei sämtlichem Material weitestgehend verzerrungsfrei.

Das RMS-Einhüllendenermittlungsverfahren wurde im Verlauf der Untersuchungen gegenüber den älteren Software-Versionen grundlegend verändert. Die neue Implementierung, dessen programmiertechnische Umsetzung in Listing 3 auf Seite 8 dokumentiert wurde, ermöglicht nun wie beim Spitzenwertverfahren die unabhängige Definition von Attack- und Release-Zeit, anstatt – wie in [8] realisiert – mit nur einer einzigen Konstante („Lambda“) zu arbeiten, über die Attack- und Release-Zeit zusammenhängen. Die Folge dieser Veränderung war ein deutlich verbessertes Klangverhalten: Das „alte“ RMS-Verfahren litt unter teilweise extremen Verzerrungen, die schon bei sehr geringen Pegelspitzen auftraten. Die neue Umsetzung mit voneinander unabhängigen Zeitkonstanten verhielt sich hier deutlich vorteilhafter; allerdings ließen sich auch bei angepassten Zeitkonstanten noch leichte Verzerrungen ausmachen, die beim Spitzenwert-Verfahren

nicht auftraten. Rauschmodulationen waren dagegen – wohlgermerkt bei identischen Zeitkonstanten wie beim Spitzenwert-Verfahren – fast nicht auszumachen. Damit zeigt das RMS-Verfahren ein fast gegenteiliges Verhalten zum Spitzenwert-Verfahren.

Beide sind in der neuesten *CompExSimPlus*-Version wie beschrieben auch jeweils in einer „release loss input“-Variante realisiert, in der ein nur leicht abgeänderter Algorithmus zum Einsatz kommt²⁰. Ein Unterschied der „release loss input“-Varianten zu den „herkömmlichen“ Verfahren war nur schwer hörbar. Im Falle des Verfahrens „Peak (release loss input)“ klangen die Signale noch etwas weniger verzerrt als beim normalen Spitzenwert-Verfahren, weshalb dieser Algorithmus für die weiteren Untersuchungen vorgezogen wurde. Bei der RMS-Variante hingegen war der umgekehrte Effekt zu beobachten, wenn auch hier die Unterschiede ebenfalls nur extrem gering ausfielen: Das Verfahren „RMS (release loss input)“ verhielt sich in Bezug auf Verzerrungen etwas problematischer als das normale RMS-Verfahren und schied daher aus.

Die modifizierte Spitzenwert-Ermittlung nach dem *HighCom*-Verfahren – im Folgenden vereinfachend „HighCom-Verfahren“ genannt – schien nach den ersten Höreindrücken die Vorteile der vorangegangenen Spitzenwert- und RMS-Algorithmen zu vereinen: Auch stark komprimierte Signale klangen weitgehend verzerrungsfrei; störende Rauschfahnen waren ebenfalls nicht hörbar.

Das Hilbert-Verfahren führte hingegen zu einer ausgesprochen negativen Bewertung. Unabhängig vom komprimierten Audiosignal klangen die Ergebnisse allesamt stark verzerrt, was sich auch durch eine Verringerung des Eingangspegels, eine schwächere Komprimierung oder eine Anpassung der Zeitkonstanten nur unwesentlich änderte. Die Rauschunterdrückung selbst schien zwar recht gut zu funktionieren, aber die starken Artefakte schon bei geringen Pegelspitzen ließen das Hilbert-Verfahren klanglich wenig brauchbar erscheinen. Diese Problematik scheint dem Entwickler des Verfahrens bekannt und prinzipbedingt unvermeidbar zu sein [8]. Die Vorauswahl ergab also eine Eingrenzung auf die drei Verfahren „RMS“, „Peak (release loss input)“ sowie „HighCom“. Die drei anderen Algorithmen wurden für die weiteren Hörvergleiche aufgrund ihrer schlechteren klanglichen Eigenschaften nicht weiter einbezogen.

Im Folgenden kristallisierten sich Rauschverhalten und Verzerrungen als die beiden Hauptkriterien heraus. Wie in Kapitel 2 bereits ausgeführt, sind die Verzerrungen dadurch zu erklären, dass die Einhüllendenermittlung nicht immer schnell genug reagieren kann: Bei Dynamiksprüngen ist für kurze Zeit in der Kompressorstufe eine viel zu hohe Signalverstärkung eingestellt, die nun für einen kurzen Moment auch auf die lautereren Signalanteile angewendet wird und dadurch Kompressor-interne Übersteuerungen hervorruft. Das Kriterium des Rauschverhaltens beschreibt die Hörbarkeit von Rauschmodulationen durch Rauschfahnen und ähnliche Artefakte. Teilweise war im Vergleich zum Original auch eine Veränderung der Klangfarbe festzustellen: Stark komprimierte Audiosignale klangen in manchen Fällen dumpf und wenig „offen“, weshalb dem Fragebogen,

²⁰siehe Abschnitt 2.2.1

der den Probanden während des Hörvergleichs in Detmold vorlag, auch das Kriterium „Klangfarbe“ hinzugefügt wurde.

Die Parameter Kompressionsfaktor und Threshold bestimmen die Intensität der Rauschunterdrückung. Hier zeigte sich nach einigen Versuchen, dass es lohnenswert ist, in den vier Frequenzbändern unterschiedliche Einstellungen zu wählen. Erwartungsgemäß ist das Rauschen in den oberen Frequenzbereichen wesentlich störender als in den unteren; im Bassbereich schließlich ist es so gut wie nicht wahrnehmbar. Wie eingangs in Kapitel 2 erwähnt, ist auf der anderen Seite die Energieverteilung bei typischen Signalen recht „tiefenlastig“. Um Verzerrungen durch kurzzeitige Kompander-interne Übersteuerungen zu vermeiden, liegt es nahe, nur in den Bereichen zu kompandieren, wo dies auch klanglich sinnvoll ist. Dies führte zu der Idee, den Kompander im unteren Frequenzbereich weniger stark einzusetzen, um gewissermaßen „Headroom“ für eine stärkere Rauschunterdrückung in den oberen Frequenzbändern zu gewinnen. Das Ergebnis war bei allen Klangbeispielen überzeugend: Die Verzerrungen, die besonders der E-Bass durch seine tieffrequenten, extrem impulshaften Signale verursachte, wurden auf diese Art und Weise deutlich reduziert, ohne dass das hörbare Rauschen anstieg.

Die Definition geeigneter zeitlicher Regelgrößen erwies sich besonders bei Breitband-Kompandern als wichtig, um störende Rauschfahnen und Verzerrungen zu minimieren. Dabei waren insbesondere die Klangunterschiede verschiedener Release-Zeiten deutlich wahrnehmbar. Entsprechend den in Kapitel 3 dargestellten Erwartungen ließen wesentlich höhere Werte als 100 Millisekunden sowohl bei impulshaften Saiteninstrumenten als auch bei Sprachsignalen deutliche Rauschmodulationen hörbar werden. Im Zusammenhang mit verschiedenen Attack-Zeiten fiel vor allem auf, dass mit steigenden Werten auch die Verzerrungen bei impulshaften Signalen wie E-Bass oder ähnlichem zunahmen. Der optimale Wert schien im Bereich von nur einigen Millisekunden und damit wesentlich niedriger als bei derzeitigen Sennheiser-Systemen zu liegen.

Wie oben bereits angedeutet, veränderte die Umschaltung auf das 4-bandige Kompanderverfahren die Klangqualität beträchtlich. Besonders die Unterscheidung verschiedener Zeitkonstanten stellte sich damit jedoch teilweise als sehr schwierig dar, offenbar weil durch das Multiband-Verfahren an sich bereits Rauschmodulationen und Verzerrungen weitgehend vermieden wurden. Weitere Hörvergleiche in dieser Richtung erfolgten daher vor allem im zweiten Abschnitt mit Hilfe mehrerer Probanden.

5.2 Ergebnisse des Probanden-Hörvergleichs

Am Hörvergleich in Detmold nahmen in einem Zeitraum von ungefähr einer Woche insgesamt 17 Probanden teil. Sämtliche Teilnehmer waren Studierende oder Lehrende im Rahmen der dortigen Tonmeister-Ausbildung, daher kann davon ausgegangen werden, dass das Testpublikum in jedem Fall analytisch-technisches Hören gewohnt war. Die Ergebnisse für jeden der insgesamt 23 Paarvergleiche sind im Folgenden dokumentiert: Die Balkendiagramme zeigen die Bewertung für die vier Kriterien „Rauschverhalten“, „Verzerrungen“, „Klangfarbe“ und „Gesamteindruck“, anhand derer die Beispiele wie beschrieben jeweils nach dem einfachen Prinzip „besser/schlechter“ bewertet werden mussten. Die bei einigen Paarvergleichen auf eine niedrigere Gesamtzahl als 17 führende Summe beider Balken resultiert aus einzelnen ungültigen Bewertungen oder nicht ausgefüllten Auswahlfeldern auf den Fragebögen einiger Teilnehmer.

Rechts neben der Grafik sind die im jeweiligen Paarvergleich verwendeten Kompander-Einstellungen dokumentiert. Die Werte, welche jeweils den Unterschied zwischen Hörbeispiel A und B bildeten, sind durch Fettdruck hervorgehoben.

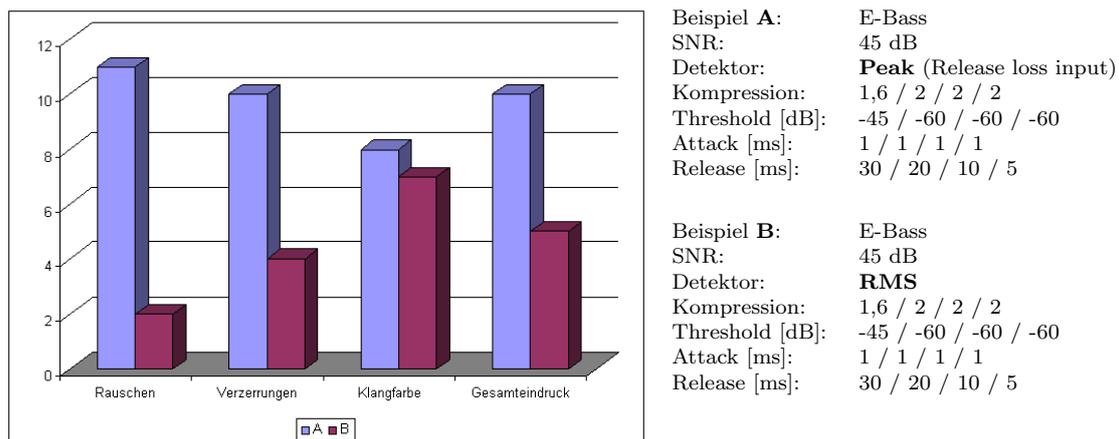
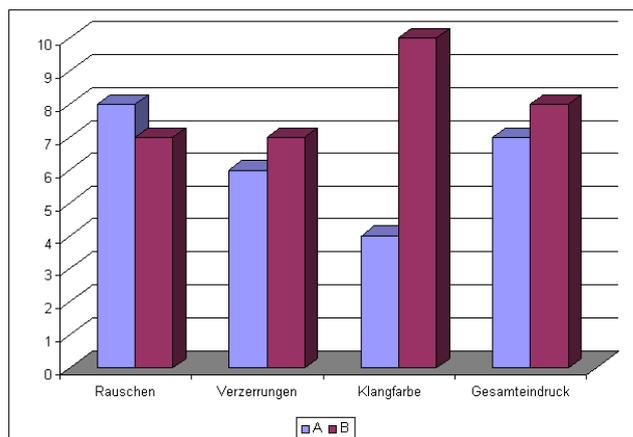


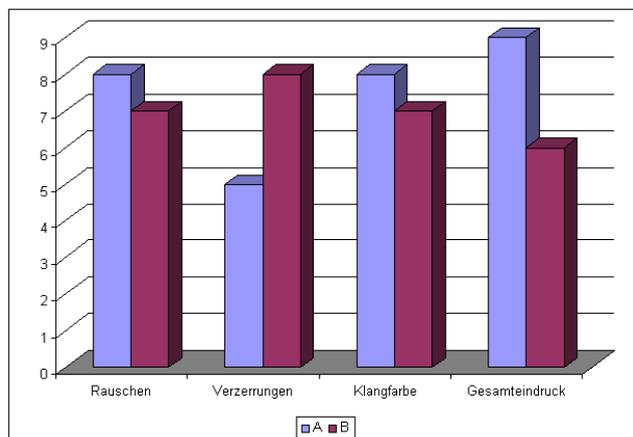
Abb. 5.1: Untersch. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 SNR: 45 dB
 Detektor: **HighCom**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

Beispiel B:
 SNR: 45 dB
 Detektor: **RMS**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

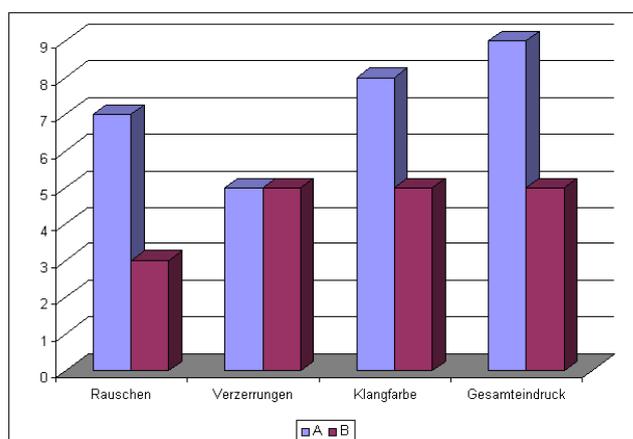
Abb. 5.2: Unterschiedl. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 SNR: 45 dB
 Detektor: **Peak (Release loss input)**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Beispiel B:
 SNR: 45 dB
 Detektor: **HighCom**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

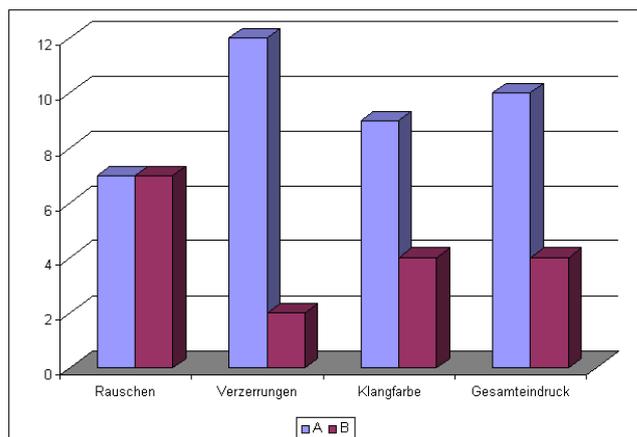
Abb. 5.3: Unterschiedl. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 SNR: 65 dB
 Detektor: **Peak (Release loss input)**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Beispiel B:
 SNR: 65 dB
 Detektor: **RMS**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

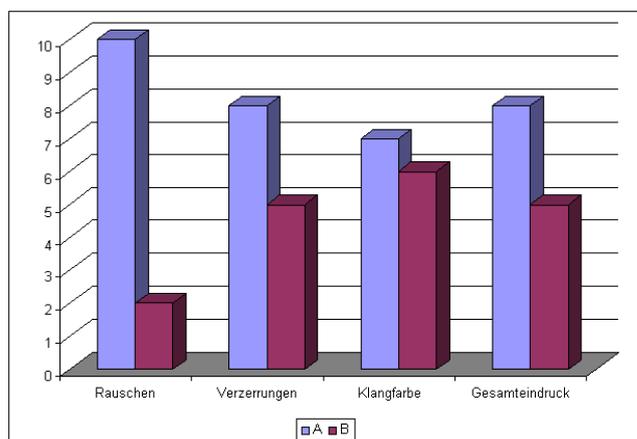
Abb. 5.4: Unterschiedl. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 SNR: 65 dB
 Detektor: **HighCom**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

Beispiel B:
 SNR: 65 dB
 Detektor: **RMS**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

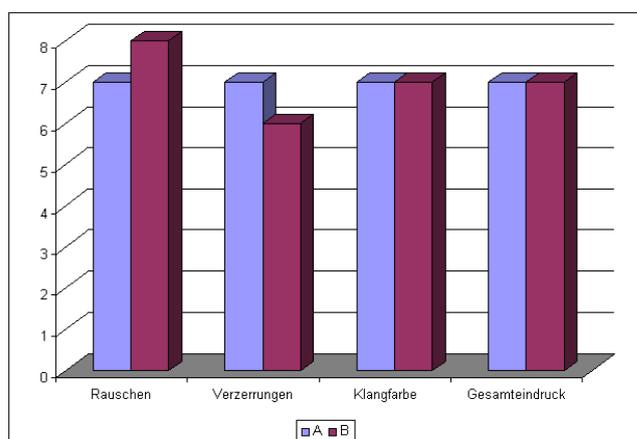
Abb. 5.5: Unterschiedl. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 SNR: 65 dB
 Detektor: **Peak (Release loss input)**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Beispiel B:
 SNR: 65 dB
 Detektor: **HighCom**
 Kompression: 1,6 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -45 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

Abb. 5.6: Unterschiedl. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 SNR: 55 dB
 Detektor: **Peak (Release loss input)**
 Kompression: 2 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 2 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Beispiel B:
 SNR: 55 dB
 Detektor: **Peak (Release loss input)**
 Kompression: 1 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Abb. 5.7: Unterschiedl. Kennlinien

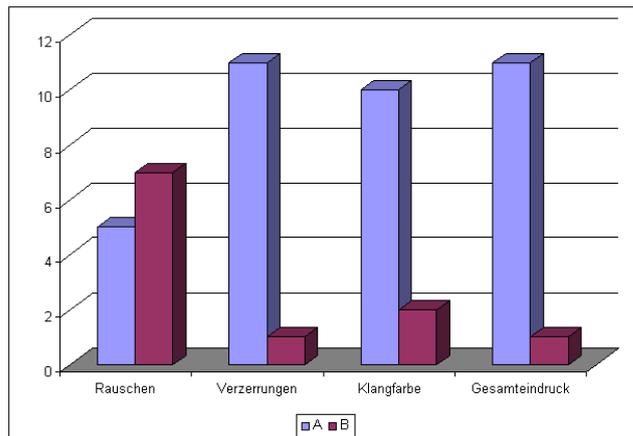


Abb. 5.8: Unterschiedl. Kennlinien

Beispiel A:
 E-Bass
 SNR: 65 dB
 Detektor: Peak (Release loss input)
 Kompression: 1 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Beispiel B:
 E-Bass
 SNR: 65 dB
 Detektor: Peak (Release loss input)
 Kompression: 2 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

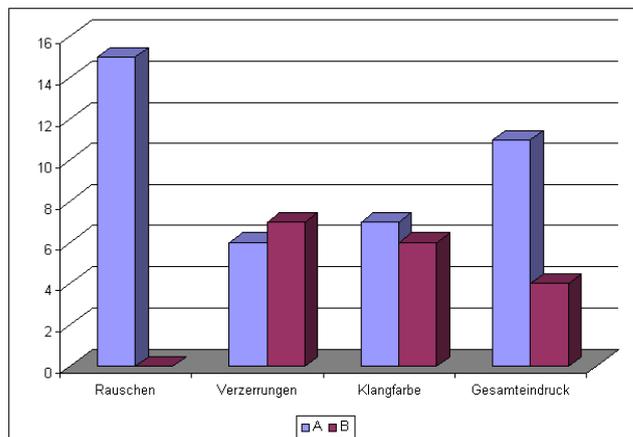


Abb. 5.9: Unterschiedl. Kennlinien

Beispiel A:
 E-Bass
 SNR: 50 dB
 Detektor: Peak (Release loss input)
 Kompression: 1 / 2 / 2 / **2,6**
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Beispiel B:
 E-Bass
 SNR: 50 dB
 Detektor: Peak (Release loss input)
 Kompression: 1 / 2 / 2 / **2**
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

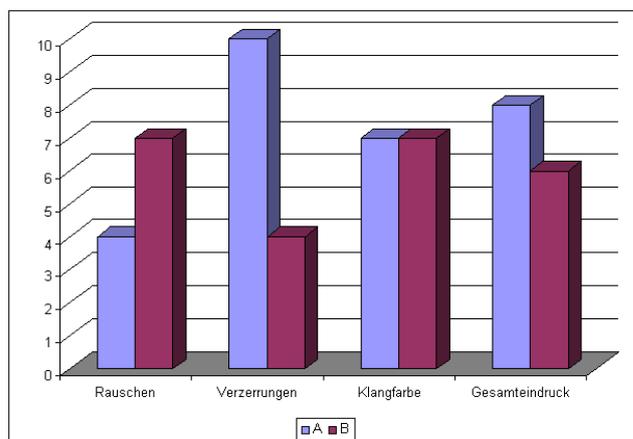
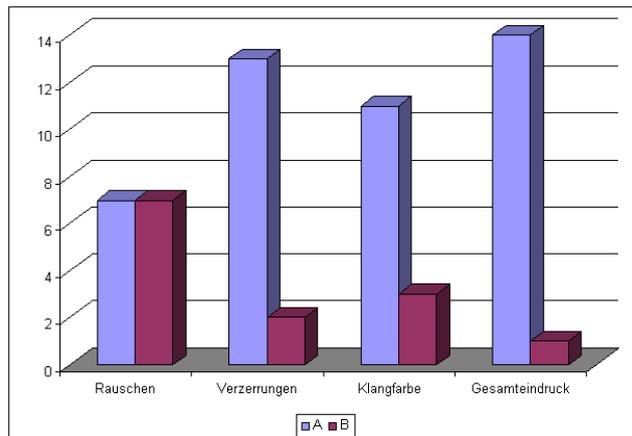


Abb. 5.10: Unterschiedl. Zeitkonstanten

Beispiel A:
 E-Bass
 SNR: 60 dB
 Detektor: Peak (Release loss input)
 Kompression: 1,4 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: **30 / 20 / 10 / 5**

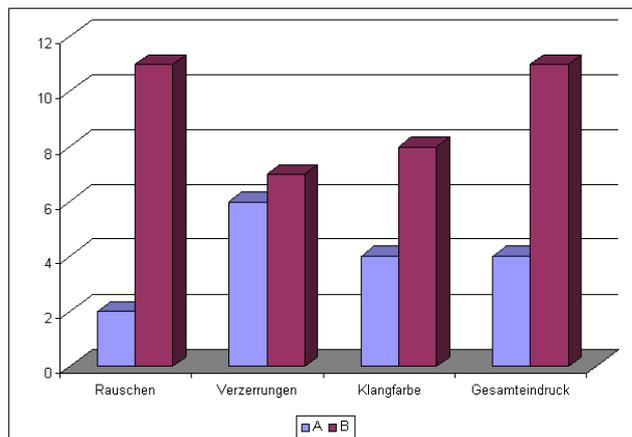
Beispiel B:
 E-Bass
 SNR: 60 dB
 Detektor: Peak (Release loss input)
 Kompression: 1,4 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: **10 / 10 / 10 / 10**
 Release [ms]: **100 / 100 / 100 / 100**



Beispiel A: E-Bass
 SNR: 50 dB
 Detektor: RMS
 Kompression: 1,4 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Beispiel B: E-Bass
 SNR: 50 dB
 Detektor: RMS
 Kompression: 1,4 / 2 / 2 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 10 / 10 / 10 / 10
 Release [ms]: 100 / 100 / 100 / 100

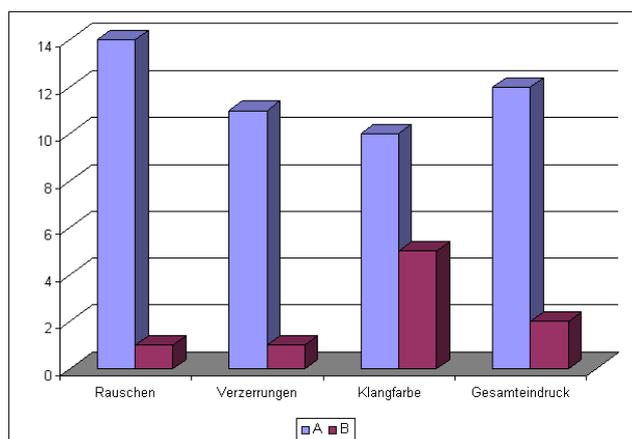
Abb. 5.11: Unterschiedl. Zeitkonstanten



Beispiel A: E-Bass
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,4 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

Beispiel B: E-Bass
KEIN Rauschen
KEIN Komp.

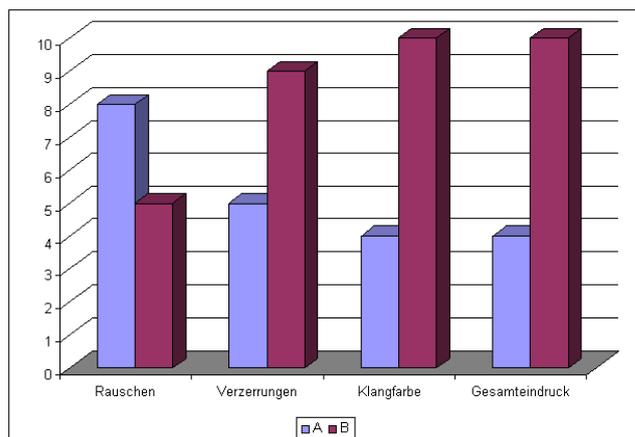
Abb. 5.12: „Hidden reference“



Beispiel A: E-Bass
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,4 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

Beispiel B: E-Bass
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,4 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20
 $+k_2, +k_3$

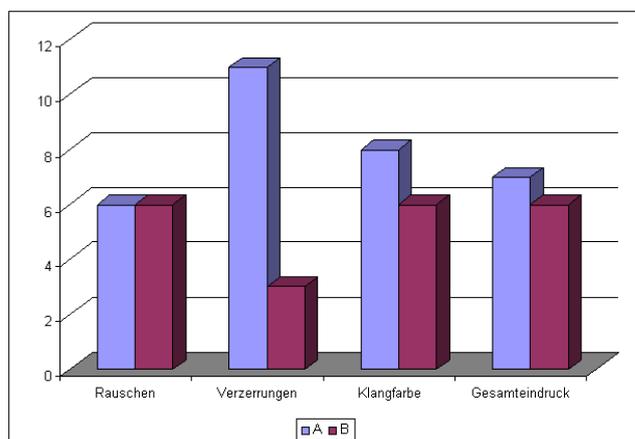
Abb. 5.13: Oberton-Addition (k_2, k_3)



Beispiel A:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: **HighCom**
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

Beispiel B:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: **Peak** (Release loss input)
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

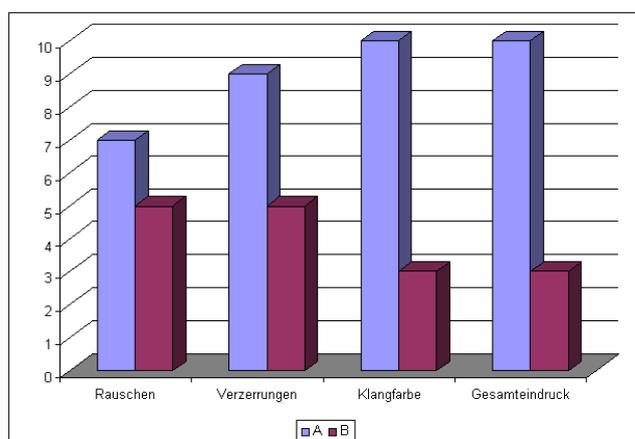
Abb. 5.14: Unterschiedl. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: **RMS**
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

Beispiel B:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: **HighCom**
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

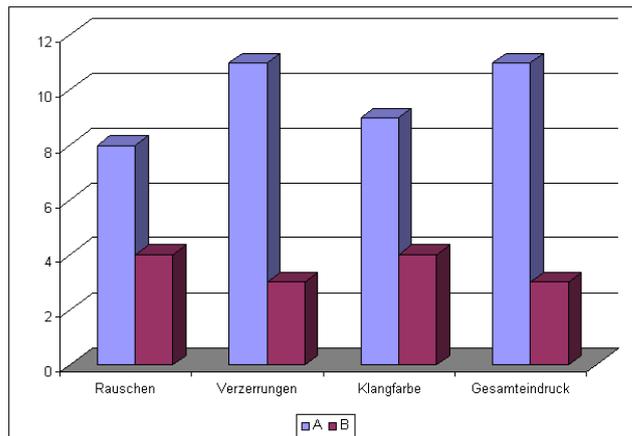
Abb. 5.15: Unterschiedl. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: **Peak** (Release loss input)
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Beispiel B:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: **RMS**
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

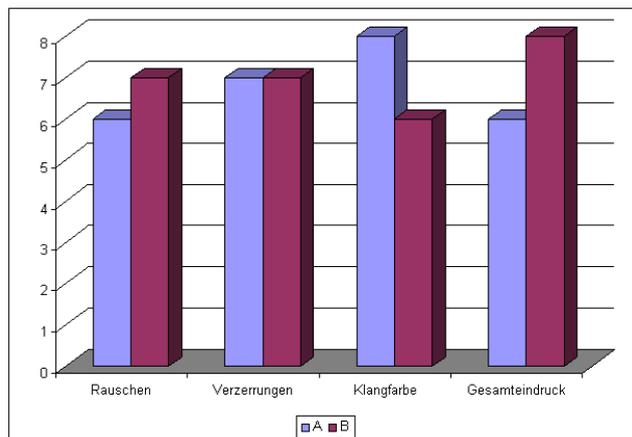
Abb. 5.16: Unterschiedl. Einhüllendenermittlung



Beispiel A:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: RMS
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

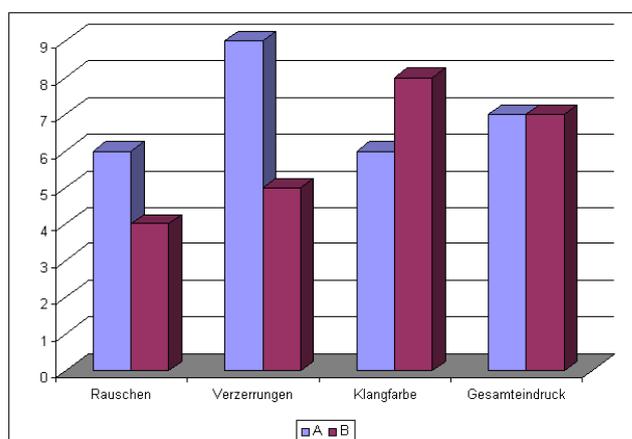
Beispiel B:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 2 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5

Abb. 5.17: Unterschiedl. Kennlinien



Beispiel A:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20
 + k_2

Beispiel B:
 Sprache (männl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 1 / 1 / 1 / 1
 Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 + k_3

Abb. 5.18: Oberton-Addition (k_2/k_3)

Beispiel A:
 Gesang (weibl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: RMS
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 3 / 3 / 3 / 3
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 100 / 50 / 30 / 20
 Delay [ms]: 200 / 200 / 200 / 200
 + **Kompressor**

Beispiel B:
 Gesang (weibl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 3 / 3 / 3 / 3
 Fast Release [ms]: 30 / 20 / 10 / 5
 Release [ms]: 100 / 50 / 30 / 20
 Delay [ms]: 200 / 200 / 200 / 200

Abb. 5.19: Kompression

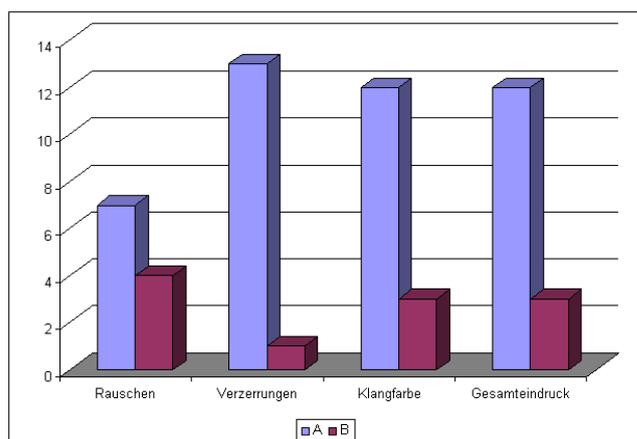


Abb. 5.20: Unterschiedl. Zeitkonstanten

Beispiel A:
 Gesang (weibl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: Peak (Release loss input)
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 3 / 3 / 3 / 3
 Release [ms]: 100 / 50 / 30 / 20

Beispiel B:
 Gesang (weibl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: Peak (Release loss input)
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 30 / 30 / 30 / 15
 Release [ms]: 100 / 50 / 30 / 20

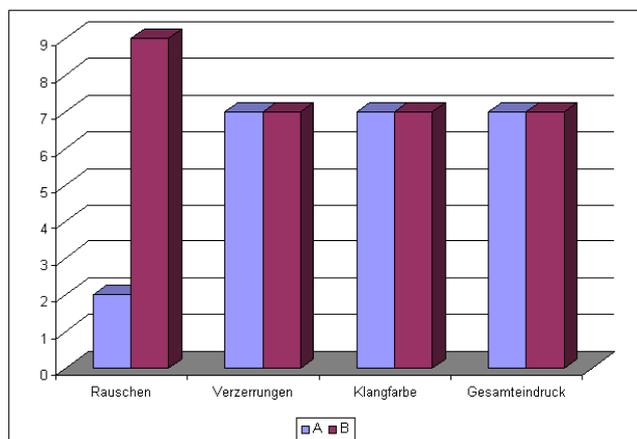


Abb. 5.21: Frequenzgesteuerte Kompression

Beispiel A:
 Gesang (weibl.)
 SNR: 45 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 3 / 3 / 3 / 3
 Fast Release [ms]: 50 / 30 / 20 / 10
 Release [ms]: 50 / 30 / 20 / 10
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

Beispiel B:
 Gesang (weibl.)
 SNR: 45 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 3 / 3 / 3 / 3
 Fast Release [ms]: 50 / 30 / 20 / 10
 Release [ms]: 50 / 30 / 20 / 10
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20
 + DeHisser

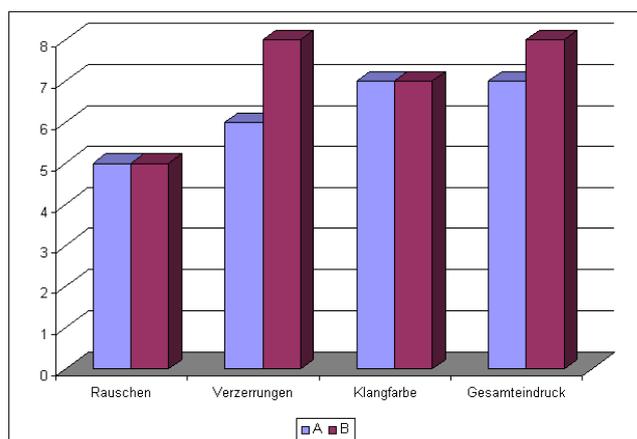


Abb. 5.22: Frequenzgesteuerte Kompression

Beispiel A:
 Gesang (weibl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 3 / 3 / 3 / 3
 Fast Release [ms]: 50 / 30 / 20 / 10
 Release [ms]: 50 / 30 / 20 / 10
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20
 + DeHisser

Beispiel B:
 Gesang (weibl.)
 SNR: 60 dB
 Detektor: HighCom
 Kompression: 1 / 1,6 / 1,8 / 2
 Threshold [dB]: -60 / -60 / -60 / -60
 Attack [ms]: 3 / 3 / 3 / 3
 Fast Release [ms]: 50 / 30 / 20 / 10
 Release [ms]: 50 / 30 / 20 / 10
 Delay [ms]: 20 / 20 / 20 / 20

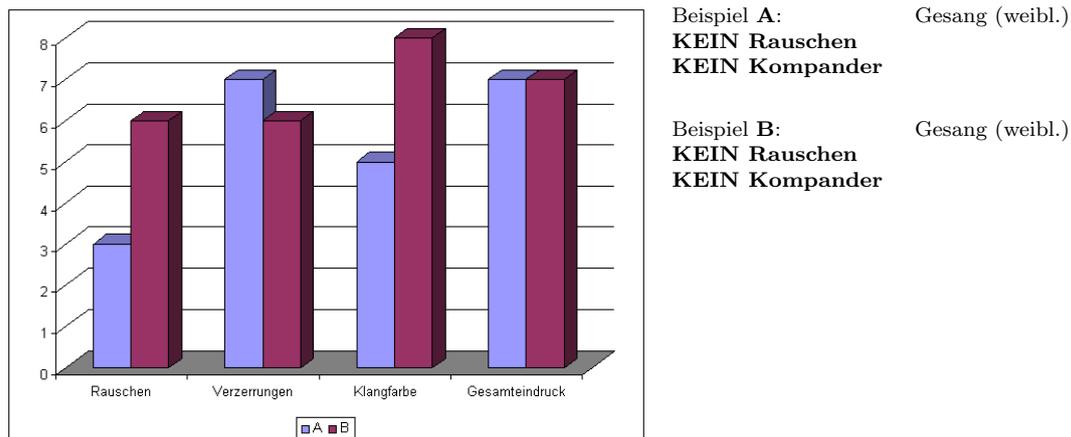


Abb. 5.23: Identische Beispiele

Wie in Abbildung 5.1 bis 5.6 abzulesen, zielten die ersten Paarvergleiche darauf ab, eine Bewertung der drei zur Disposition stehenden Einhüllendenermittlungsverfahren zu erhalten. Dabei kam das Musikbeispiel „E-Bass“ zum Einsatz, das sich wegen seiner äußerst impulshaften Signale im Vorfeld der Klangvergleiche sowohl im Hinblick auf Rauschverhalten als auch Verzerrungen als besonders kritisch erwiesen hatte. Die ersten drei Paarvergleiche verwenden ein recht starkes Störgeräusch von -45 dB; die nächsten drei simulieren dagegen mit einem um 20 dB niedrigeren Rauschen gute Empfangsbedingungen. Das Ergebnis der ersten Vergleiche ist dabei recht deutlich: Im ersten Fall bewertete die klare Mehrheit der Teilnehmer das Spitzenwert-Verfahren als klanglich vorteilhafter, was sowohl Rauschverhalten als auch Verzerrungen betrifft. Beim anschließenden Vergleich von RMS und HighCom dagegen lassen sich anhand dieser beiden Kriterien offenbar keine Unterschiede feststellen. Lediglich in puncto Klangfarbe wurde RMS klar bevorzugt. Der anschließende Vergleich Peak gegen HighCom offenbarte keinerlei Präferenzen.

Bei niedrigerem Rauschen fällt die Bewertung im ersten Falle ähnlich aus, und es lässt sich eine klare Bevorzugung des Spitzenwert-Verfahrens gegenüber RMS ablesen. Die anschließende zweite Gegenüberstellung von HighCom und RMS führt allerdings zu einem anderen Ergebnis als im ersten Durchgang mit stärkerem Rauschen: HighCom wird gegenüber RMS deutlich bevorzugt, vor allem was Verzerrungen und Klangfarbe betrifft. Der anschließende Vergleich von Peak gegen HighCom fällt hingegen wieder weitgehend unentschieden aus.

Mit den Paarvergleichen 14, 15 und 16 (Abbildungen 5.14 bis 5.16) wurde die Gegenüberstellung der drei genannten Einhüllendenermittlungsverfahren mit einem anderen Audiobeispiel, der männlichen Stimme, wiederholt. Die Ergebnisse sind hier teilweise deutlicher: Peak wird gegenüber RMS und HighCom bevorzugt, und der Vergleich von RMS und HighCom liefert – abgesehen vom Kriterium „Verzerrungen“ – keine Entscheidung.

In Vergleich 7 bis 9 wurde untersucht, ob eine Änderung der Kompanderkennlinie in allen Frequenzbereichen gleichermaßen deutlich wahrnehmbar ist. Die ersten beiden Beispiele unterscheiden sich im Kompressionsfaktor des tiefsten der vier Frequenzbänder

(Abbildung 5.7, 5.8), während im nächsten Vergleich (Abbildung 5.9) die Kompression im oberen Frequenzbereich nur leicht verändert wurde. Wie bei den Einhüllendenermittlungungsverfahren wurde in Beispiel 17 (Abbildung 5.17) der Vergleich mit anderem Audiomaterial wiederholt. Das Ergebnis entspricht offenbar dem bereits im vorigen Abschnitt beschriebenen Phänomen: Im tiefen Frequenzbereich wird kein besseres Rauschunterdrückungsverhalten wahrgenommen, während im hohen Bereich ausnahmslos alle Teilnehmer einen Unterschied feststellen. Bei der menschlichen Stimme wird sogar das schwächer komprimierte Signal wegen der geringeren Verzerrungen und des positiveren klanglichen Gesamteindrucks bevorzugt.

Angesichts der Vielzahl der möglichen Kompander-Abstimmungen im Bereich der zeitlichen Regelgrößen konnte im Rahmen des Probanden-Hörvergleichs nur eine recht oberflächliche Untersuchung erfolgen. Bei drei Paarvergleichen (Abbildung 5.10, 5.11 und 5.20) wurden wiederum mit zwei verschiedenen Audiobeispielen stark unterschiedliche Attack- und Release-Zeiten eingestellt, um eine grundsätzliche Tendenz feststellen zu können. Während im ersten Fall offenbar nur geringe Unterschiede wahrnehmbar waren, werden im zweiten Vergleichspaar die kürzeren Attack- und Release-Zeiten bevorzugt. Dies bestätigt sich beim dritten Beispiel: Die Verzerrungen der weiblichen Gesangsstimme scheinen bei einer extrem kurzen Attack-Zeit von nur drei Millisekunden wesentlich geringer zu sein als bei einem Wert von 30. Interessanterweise wird das Rauschverhalten im Beispiel 10 bei einer längeren Release-Zeit von 100 Millisekunden in allen vier Bändern nicht schlechter beurteilt als bei wesentlich kürzeren Release-Zeiten. Auch im nächsten Vergleichspaar, welches das RMS-Einhüllendenermittlungungsverfahren verwendet, wird in dieser Hinsicht kein Unterschied wahrgenommen. Allerdings lassen sich die unterschiedlichen Zeitkonstanten offenbar gerade bei diesem Beispiel anhand der Verzerrungen identifizieren: Wie auch im Falle der Gesangsstimme sind diese bei sehr kurzen Attack- und moderaten Release-Zeiten wesentlich geringer.

Die im Probanden-Hörvergleich an verschiedenen Stellen eingestreuten DSP-Effekte brachten gegenüber den verschiedenen Vergleichen klassischer Kompander-Parameter recht eindeutige Aussagen. Aus Abbildung 13 ist klar ersichtlich, dass der komprimierte E-Bass von einer Addition harmonischer und unharmonischer Obertöne klanglich offenbar nicht profitiert. Sogar das Rauschverhalten wird beim bearbeiteten Beispiel negativ bewertet, was daran liegen könnte, dass wegen der Aufhellung der Klangfarbe durch Oberton-Addition auch das Störgeräusch stärker erscheint. – Während im Vergleich 13 gleichermaßen geradezahlige (k_2) und ungeradezahlige (k_3) Harmonische hinzugerechnet wurden, differenziert Paarvergleich 18 zwischen diesen beiden. Trotz Verwendung der männlichen Stimme ist jedoch keine Bevorzugung eines der beiden Ergebnisse erkennbar.

Abbildung 19 lässt erkennen, dass die Verwendung eines Kompressors nicht zu einer klanglichen Verbesserung führt. Im Gegenteil scheinen dadurch sogar vermeintlich mehr Verzerrungen als beim Originalsignal wahrgenommen zu werden. Auch die Verwendung eines DeHissers in den vorletzten zwei Vergleichspaaren (Abbildung 5.21, 5.22) wird

nicht positiver als das unbearbeitete Signal bewertet. Ähnlich wie im Falle der Oberton-Addition scheint sich vielmehr das subjektiv empfundene Rauschverhalten zu verschlechtern.

5.3 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Wie die Balkendiagramme zeigen, brachten nicht alle Paarvergleiche aussagekräftige Ergebnisse. Bereits im Falle der Einhüllendenermittlungsverfahren, die im vorangegangenen ersten Abschnitt der Hörvergleiche so deutliche Klangunterschiede erkennen ließen, fällt eine eindeutige Einstufung schwer. Offensichtlich waren die Unterschiede durch das Multiband-Kompanderverfahren, welches bei allen Beispielen des Probanden-Hörvergleichs ausschließlich verwendet wurde, wesentlich geringer als beim Breitband-Verfahren, das deutlich stärkere Artefakte produzierte. Dennoch lässt sich insgesamt eine Bevorzugung des Spitzenwert-Einhüllendenermittlungsverfahrens feststellen, welche besonders bei der männlichen Stimme deutlich wird. Die im ersten Abschnitt der Hörvergleiche festgestellte Anfälligkeit des Verfahrens für Rauschmodulationen kommt offenbar durch die spektrale Differenzierung des Multiband-Verfahrens weitestgehend nicht zum Tragen.

Bezüglich der Parameter Kompressionsfaktor und Threshold lassen sich interessante und recht eindeutige Aussagen treffen: Offensichtlich ist der Einsatz eines Kompandersystems bei tiefen Frequenzen so gut wie unhörbar. Dagegen scheint bei hohen Frequenzen bereits ein Ratio-Unterschied im Nachkommastellen-Bereich – im obigen Probanden-Vergleich nahmen ausnahmslos alle Teilnehmer einen Unterschied zwischen den Kompressionsfaktoren 2 und 2,6 wahr – eindeutig am besseren Rauschunterdrückungsverhalten identifizierbar zu sein. Wie in Abschnitt 5.1 bereits angedeutet, scheint es angesichts der je nach Signalstruktur mehr oder weniger unvermeidlichen Verzerrungen durch kurzzeitige interne Übersteuerungen bei plötzlichen Pegelspitzen sinnvoll zu sein, im tieffrequenten Bereich nur wenig oder sogar überhaupt nicht zu kommandieren – dies lässt sich durch die Wahl eines geringeren Kompressionsfaktors und eines höheren Threshold-Wertes erreichen – und den dadurch gewonnenen Headroom für eine stärkere Rauschunterdrückung im oberen Frequenzbereich zu nutzen.

Die Bewertung der zeitlichen Regelgrößen zeigt trotz der zwangsläufig begrenzten Vergleichsanzahl die Tendenz, dass mit wachsender Attack-Zeit die Verzerrungen deutlich zunehmen. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die Dynamikregelung des Kompandersystems bei kürzerer Attack-Zeit schnell auf Pegelsprünge reagieren und die Verstärkung reduzieren kann, was interne Übersteuerungen vermeidet. Eine extrem kurze Attack-Zeit kann allerdings, wie in Kapitel 2 beschrieben, zu Artefakten im Ausklang von Tönen führen.

Auch bei den zeitlichen Regelgrößen ist deutlich festzustellen, dass die klanglichen Unterschiede wesentlich geringer ausfallen als im ersten Abschnitt der Hörvergleiche, in dem vorwiegend Breitband-Systeme verglichen wurden. Wiederum scheint also das Multiband-Verfahren die Unterschiede anderer Parameter zueinander zu egalisieren.

Bemerkenswert war bereits während der ersten Untersuchungen, dass die in Kapitel 2 erwähnten Artefakte wie beispielsweise der sogenannte Schellenringeffekt im Verlauf der Hörvergleiche zu keinem Zeitpunkt wahrnehmbar waren. Durch die digitale Realisierung

der Kompaner-Elemente und die dadurch gewährleistete exakt komplementäre Arbeitsweise beider Systemhälften werden derartige Tracking-Probleme – wie in Abschnitt 2.5 vorhergesagt – offenbar hinfällig.

5.4 Konkrete Empfehlungen für die Praxis

Über die rein deskriptive Auswertung hinaus soll der Versuch einer weitergehenden Erklärung unternommen und konkrete Empfehlungen für den praktischen Einsatz von Kommandersystemen ausgesprochen werden. Dazu seien einige Erfahrungen im Zusammenhang mit dem Probanden-Hörvergleich in Detmold erwähnt, die aus den rein quantitativen Angaben der Fragebögen nicht hervorgehen, aber im Verlauf der Tests umso deutlicher geworden sind.

Trotz der Beschränkungen auf nur drei verschiedene Audio-Testmaterialien, die als Grundlage für die 46 auf verschiedene Art und Weise kommandierten Ergebnisse dienen, nahmen die Hörvergleiche pro Person zwischen 30 und 45 Minuten in Anspruch. Obwohl sich die zur Disposition gestellten Beispiele teilweise durch grundlegende Parameter unterscheiden und bei zahlreichen Beispielen durch extremes Störrauschen deutliche Artefakte provoziert werden sollten, waren die meisten Klangunterschiede nach Aussage vieler Probanden nur extrem schwer wahrzunehmen. Einigen Teilnehmern war trotz mehrfachen Hörens der jeweiligen Beispielpaare eine endgültige Entscheidung bis zum Schluss nicht möglich, so dass sie einzelne Auswahlfelder auf ihrem Fragebogen unbeantwortet ließen. Dabei sei an die Tatsache erinnert, dass die Hörvergleiche unter vergleichsweise idealen Bedingungen stattfanden: Die verwendete Abhörkette lag in ihrer Qualität deutlich über dem Klangniveau gängiger Beschallungssysteme. Die Vermutung liegt daher nahe, dass unter typischen PA-Bedingungen viele Unterschiede noch ungleich schwerer oder sogar überhaupt nicht mehr wahrnehmbar gewesen wären. Dies spiegelt sich auch darin wider, dass alle Teilnehmer den Hörvergleich mit Hilfe des elektrostatischen Kopfhörers durchführten und die – naturgemäß weniger fein auflösenden – Studiolautsprecher von keinem der 17 Probanden für den gesamten Test verwendet wurden. Angesichts dieser Tatsachen bedürfen die obigen Hörvergleich-Ergebnisse sicherlich einer gewissen Relativierung: Das Multibandverfahren scheint klanglich bereits ein so hohes Niveau zu ermöglichen, dass weitere Parameter-Änderungen von dort aus teilweise nur noch schwer wahrnehmbar sind und daher eine unbedingte Relevanz sämtlicher einstellbarer Parameter für den praktischen Alltag drahtloser Mikrofonsysteme zumindest fragwürdig erscheint.

Angesichts der Versuchsergebnisse erscheint es sinnvoll, bei der Entwicklung von Kommandersystemen mehr als nur eine Einstellung zu treffen. Dank hochentwickelter DSP-Bausteine ließen sich mehrere Presets mit unterschiedlichen Parametern auf kleinstem Raum problemlos realisieren. Besonders sinnvoll erscheint eine Anpassung auf unterschiedliche Empfangsbedingungen, denn je nach Intensität des Störrauschens bedarf es einer unterschiedlich starken Rauschunterdrückung. Je stärker allerdings die Rauschunterdrückung arbeitet, desto eher werden – trotz großer klanglicher Fortschritte dank Multiband-Technik – die verschiedenen Artefakte hörbar. Es wird daher empfohlen, die Kennlinien eines Kommandersystems so zu definieren, dass die Intensität der Kommandierung nicht wesentlich über eine effektive Unterdrückung des realen Störrauschens hinaus geht. Eine sehr große Systemdynamik von beispielsweise 115 dB(A) überschreitet sogar

die theoretisch erreichbaren Werte der CD, wird erkauft durch unnötige Artefakte und erscheint daher zumindest aus „tonmeisterlicher“ Sicht wenig sinnvoll.

Des Weiteren ist eine Anpassung der zeitlichen Regelgrößen an die Art des anliegenden Audiosignals sinnvoll. Die Hörvergleiche haben gezeigt, dass Saiteninstrumente wie beispielsweise E-Bass wegen ihrer oft starken Impulshaltigkeit wesentlich stärker als menschliche Stimmen dazu neigen, Rauschmodulationen zu produzieren.

Konkret führen diese Überlegungen auf drei unterschiedliche Presets:

Sprache und Gesang											
1.	<table border="1"> <tr> <td>Einhüllendenermittlungsverfahren</td> <td>Peak (release loss input)</td> </tr> <tr> <td>Kompressionsfaktor</td> <td>1,2 / 1,4 / 1,8 / 2,4</td> </tr> <tr> <td>Threshold [dB]</td> <td>-30 / -40 / -60 / -60</td> </tr> <tr> <td>Attack-Zeit [ms]</td> <td>15 / 10 / 5 / 2</td> </tr> <tr> <td>Release-Zeit [ms]</td> <td>100 / 50 / 30 / 20</td> </tr> </table>	Einhüllendenermittlungsverfahren	Peak (release loss input)	Kompressionsfaktor	1,2 / 1,4 / 1,8 / 2,4	Threshold [dB]	-30 / -40 / -60 / -60	Attack-Zeit [ms]	15 / 10 / 5 / 2	Release-Zeit [ms]	100 / 50 / 30 / 20
Einhüllendenermittlungsverfahren	Peak (release loss input)										
Kompressionsfaktor	1,2 / 1,4 / 1,8 / 2,4										
Threshold [dB]	-30 / -40 / -60 / -60										
Attack-Zeit [ms]	15 / 10 / 5 / 2										
Release-Zeit [ms]	100 / 50 / 30 / 20										
Saiteninstrumente											
2.	<table border="1"> <tr> <td>Einhüllendenermittlungsverfahren</td> <td>Peak (release loss input)</td> </tr> <tr> <td>Kompressionsfaktor</td> <td>1,0 / 1,4 / 1,8 / 2,4</td> </tr> <tr> <td>Threshold [dB]</td> <td>-30 / -40 / -60 / -60</td> </tr> <tr> <td>Attack-Zeit [ms]</td> <td>5 / 4 / 3 / 2</td> </tr> <tr> <td>Release-Zeit [ms]</td> <td>30 / 20 / 10 / 5</td> </tr> </table>	Einhüllendenermittlungsverfahren	Peak (release loss input)	Kompressionsfaktor	1,0 / 1,4 / 1,8 / 2,4	Threshold [dB]	-30 / -40 / -60 / -60	Attack-Zeit [ms]	5 / 4 / 3 / 2	Release-Zeit [ms]	30 / 20 / 10 / 5
Einhüllendenermittlungsverfahren	Peak (release loss input)										
Kompressionsfaktor	1,0 / 1,4 / 1,8 / 2,4										
Threshold [dB]	-30 / -40 / -60 / -60										
Attack-Zeit [ms]	5 / 4 / 3 / 2										
Release-Zeit [ms]	30 / 20 / 10 / 5										
extrem schlechte Empfangsqualität											
3.	<table border="1"> <tr> <td>Einhüllendenermittlungsverfahren</td> <td>Peak (release loss input)</td> </tr> <tr> <td>Kompressionsfaktor</td> <td>1,2 / 1,6 / 2,6 / 3,4</td> </tr> <tr> <td>Threshold [dB]</td> <td>-30 / -40 / -60 / -60</td> </tr> <tr> <td>Attack-Zeit [ms]</td> <td>15 / 10 / 5 / 2</td> </tr> <tr> <td>Release-Zeit [ms]</td> <td>100 / 50 / 30 / 20</td> </tr> </table>	Einhüllendenermittlungsverfahren	Peak (release loss input)	Kompressionsfaktor	1,2 / 1,6 / 2,6 / 3,4	Threshold [dB]	-30 / -40 / -60 / -60	Attack-Zeit [ms]	15 / 10 / 5 / 2	Release-Zeit [ms]	100 / 50 / 30 / 20
Einhüllendenermittlungsverfahren	Peak (release loss input)										
Kompressionsfaktor	1,2 / 1,6 / 2,6 / 3,4										
Threshold [dB]	-30 / -40 / -60 / -60										
Attack-Zeit [ms]	15 / 10 / 5 / 2										
Release-Zeit [ms]	100 / 50 / 30 / 20										

Die ersten beiden Presets unterscheiden sich dabei in ihrer Attack- und Release-Zeit, die für die impulshaften Saiteninstrumente jeweils kürzer sind als für Sprache oder Gesangsstimmen. Um Verzerrungen insbesondere bei tiefen Saiteninstrumenten zu vermeiden – das E-Bass-Beispiel verhielt sich hier extrem kritisch –, wird die Kompanierung im tiefen Frequenzbereich außerdem gegenüber der Sprache/Gesang-Einstellung noch weiter reduziert. Während diese Differenzierung zwar sinnvoll, aber nicht zwingend erforderlich ist, wird die Einrichtung der dritten Voreinstellung in jedem Fall empfohlen, denn hier ist die Kompanierung wesentlich stärker. So wird auch noch bei sehr starkem Rauschen von ungefähr -40 dB eine ausreichende Rauschunterdrückung gewährleistet, deren Artefakte sich in akzeptablen Grenzen halten. Beispielsweise im EB-Bereich ist dadurch eine effektive Erhöhung der Reichweite denkbar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in verschiedenen Abschnitten alle für ein digitales Kommandersystem zur Verfügung stehenden Parameter untersucht und nach ihrem klanglichen Einfluss auf verschiedenes Musikmaterial bewertet. Daraus sind detaillierte Empfehlungen für die Konstruktion klanglich optimaler digitaler Kommandersysteme für verschiedenartige Signale und unterschiedliche Empfangsbedingungen entstanden. Die in diesem Zusammenhang wichtigsten Erkenntnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

1. Die Verwendung digitaler Kommandersysteme ermöglicht grundsätzlich eine äußerst flexible und praktikable Definition verschiedenster, auch extremer Parameter. Mit einem digitalen Kommandersystem entfallen außerdem sämtliche Probleme, die mit analogen Bauteiltoleranzen und daraus resultierenden Parameterschwankungen zusammenhängen.
2. Der mit Abstand größte klangliche Fortschritt gegenüber aktuellen Kommandern ergibt sich bei Verwendung von Multiband-Systemen. Das in der Simulationssoftware *CompExSimPlus* bereitgestellte 4-Band-Verfahren ermöglicht eine wesentlich effektivere Rauschunterdrückung bei gleichzeitiger drastischer Reduzierung von Artefakten. Wie die Probanden-Hörvergleiche gezeigt haben, ist das dadurch erreichte klangliche Niveau bereits so hoch, dass viele der bei Breitbandkommandern problemlos hörbaren Unterschiede zwischen verschiedenen Parametern nur noch recht schwer wahrnehmbar sind.
3. Auch wenn die im Breitband-Kommanderverfahren deutlich hörbaren Unterschiede zwischen den verschiedenen Einhüllendenermittlungsverfahren bei Multiband-Einstellung drastisch zusammenschrumpfen, weist das Spitzenwert-Verfahren insgesamt die besten klanglichen Eigenschaften auf. Das beim Breitband-Kommander mit Spitzenwert-Verfahren recht problematische Rauschmodulationsverhalten wird durch den Multiband-Algorithmus drastisch reduziert, und spätestens durch halbwegs angepasste zeitliche Regelgrößen werden Rauschfahnen wirkungsvoll verhindert.
4. Es ist wichtig, bei einem Multibandsystem für die einzelnen Bänder unterschiedliche Kommander-Kennlinien zu verwenden. Das störende Rauschen wird fast ausschließlich im hohen Frequenzbereich wahrgenommen; hier ist die Einstellung einer höheren Kompression zur stärkeren Rauschunterdrückung angebracht. Die Kommandierung tieffrequenter Signalanteile macht dagegen keinen Sinn, sondern führt im Gegenteil in vielen Fällen zu Kompressor-internen Übersteuerungen, die als Verzerrungen hörbar werden.
5. Die Abstimmung eines Kommandersystems stellt grundsätzlich einen Kompromiss zwischen Rauschunterdrückung und Artefakten dar. Je stärker die Rauschunterdrückung arbeitet, desto eher werden die verschiedenen prinzipbedingten Artefakte

hörbar. Es wird daher empfohlen, die Kennlinien eines Kompanadersystems so zu definieren, dass die Intensität der Kompanadierung nicht wesentlich über eine effektive Unterdrückung des realen Stör-rauschens hinaus geht.

6. Trotz der wie erwähnt bei Multibandsystemen erstaunlich geringen Unterschiede zahlt sich auch im Falle der zeitlichen Regelgrößen eine Frequenzband-differenzierte Einstellung aus. So ist es sinnvoll, Attack- und Release-Zeit auf die Wellenlängen der jeweiligen Frequenzen anzupassen, um Verzerrungen zu vermeiden. Im Rahmen der verschiedenen Hörvergleiche hat sich unabhängig vom Audiomaterial eine recht kurze Attack-Zeit bewährt, mit der Verzerrungen auf ein Minimum reduziert werden. Abhängig von der Beschaffenheit des Audiosignals muss zur Definition einer geeigneten Release-Zeit außerdem eine Anpassung an die Impulshaftigkeit des jeweiligen Materials vorgenommen werden, um hörbare Rauschfahnen zu vermeiden.
7. Trotz der großen qualitativen Fortschritte durch die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Parametereinstellungen gibt es kein Kompanadersystem, das für alle Anwendungsbereiche und Empfangsbedingungen gleichermaßen gut geeignet ist. Um für alle Situationen einen hervorragenden Klang zu gewährleisten, wird die Definition von drei unterschiedlichen Presets empfohlen, die sich durch die zeitlichen Regelgrößen und vor allem durch ihre Kompanadierungs-Intensität unterscheiden (siehe Abschnitt 5.4).

Bezüglich des Einsatzes digitaler Effekte ist es problematisch, allgemein gültige Aussagen zu treffen. Keiner der eingesetzten DSP-Effekte brachte pauschal eine subjektive klangliche Verbesserung. Selbstverständlich ist es denkbar, dass die Ursache nicht in den DSP-Effekten an sich lag, sondern beispielsweise ein anderer Kompressor zu anderen Ergebnissen geführt hätte. Dasselbe gilt für frequenzabhängige Oberton-Generatoren (z. B. Spectralizer) und frequenzabhängige Kompressions-Algorithmen (DeHisser, DeEsser etc.): Die durchgeführten Hörvergleiche lassen vermuten, dass auch hier keine generelle Bewertung möglich ist, sondern der Klang solcher Verfahren je nach Audiosignal und genauem DSP-Algorithmus positiv oder negativ beurteilt wird. Dies führt jedoch auf ein völlig eigenes Gebiet der Audioteknik und hätte den Rahmen der vorliegenden Untersuchung gesprengt, daher müssten hier gegebenenfalls eigene Untersuchungen vorgenommen werden.

Nach Ansicht des Verfassers bestünde jedoch die Gefahr, dass wegen der einseitigen Klangbeeinflussung bereits innerhalb der drahtlosen Mikrofonanlage der universelle Charakter des Systems verloren geht, weil die eingesetzten Effekte nicht bei allen Arten von Signalen zu gleichermaßen positiven Ergebnissen führen. Es erscheint daher sinnvoll, zusätzliche klangliche Signalbeeinflussungen nur einzusetzen, um eventuelle durch die Kompanadierung entstandenen Artefakte auszugleichen. Im Sinne eines möglichst universellen Systems sollte die neutrale drahtgebundene Übertragung in jedem Falle als

klangliches Vorbild angesehen werden; eventuell gewünschte Klangbeeinflussungen lassen sich je nach Geschmack des Anwenders problemlos auch an späterer Stelle in der Signalkette vornehmen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war das Multiband-Verfahren durch die Struktur der Simulationssoftware auf vier Frequenzbänder begrenzt. Mit einer Erhöhung der Bandanzahl könnte theoretisch eine weitere Klangverbesserung einhergehen. Angesichts der bereits großen klanglichen Fortschritte durch das 4-Band-Verfahren und die Tatsache, dass auch im Studiobereich keine Multiband-Effektgeräte mit mehr als vier Bändern bekannt sind, scheint dies jedoch zweifelhaft. Dagegen ist es durchaus denkbar, dass das recht neuartige und noch nicht weiter untersuchte Verfahren der in Kapitel 2 bereits kurz angesprochenen Gleitband-Kompanierung weitere Vorteile bringt; hier müssten eine entsprechende Erweiterung der Simulationssoftware und gegebenenfalls weitere klangliche Untersuchungen erfolgen.

Die vielleicht größte Herausforderung besteht jedoch in der absoluten Minimierung von Latenzen zwischen Ein- und Ausgangssignal. Die bereits bei minimalen Laufzeitdifferenzen auftretenden Klangverfärbungen durch Kammfiltereffekte würden ansonsten die klanglichen Fortschritte digitaler Multibandsysteme stark relativieren.

Langfristig liegt der Entwicklungsschwerpunkt aus naheliegenden Gründen auf komplett digitalen Systemen: Eine digitale Funkstrecke würde keine Rauschprobleme mehr mit sich bringen und so jegliche Kompaniersysteme überflüssig machen. Andererseits würden durch eine hochauflösende digitale Signalübertragung die eingangs erwähnten Bandbreiten-Begrenzungen noch problematischer, und der „Platzmangel“ im Hochfrequenzbereich nimmt aufgrund zunehmender Digitalisierung auch von Rundfunk und Fernsehen ohnehin immer weiter zu. Bei einer digitalen Signalübertragung wäre zudem in jedem Fall eine ausgefeilte Fehlerkorrektur vonnöten, die eine dem analogen System vergleichbare Übertragungssicherheit gewährleistet. Der technische und damit auch finanzielle Aufwand solcher komplett digitaler Konstruktionen ist jedoch so hoch, dass auch auf längere Sicht die Kombination von analoger Übertragungsstrecke und digitalen Kompaniern in sogenannten Hybridsystemen der in vielerlei Hinsicht optimale Weg zu sein scheint.

A Inhalt der beiliegenden CD-ROM

- Aktuelle Version der Simulationssoftware *CompExSimPlus*
- Audio-Testmaterial (wav-Dateien)
- Material zum Hörvergleich
- gesamte Diplomarbeit in elektronischer Form (Portable Document Format)

Literatur

- [1] Duncan, M. G. / Rosenberg, D. / Hoffman, G. W.: *Design Criteria of a Universal Compressor for the Elimination of Audible Noise in Tape, Disc, and Broadcast Systems*. Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 23, No. 8, 1975
- [2] Floru, Fred: *Attack and Release Time Constants in RMS-Based Feedback Compressors*. Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 47, No. 10, 1998
- [3] Hansen, Martin: *Psychoakustik und subjektive Diagnostik*. Vorlesungsskript an der Fachhochschule Oldenburg, Institut für Hörtechnik und Audiologie, 2004
- [4] Fa. Lectrosonics Inc.: *UHF Wireless Microphone Catalog*. 2003
- [5] Pfab, Michael: *Zum Einfluss von Zeitverzögerungen auf Höreignisse*. Diplomarbeit Technische Universität München, 2001
- [6] Schröder, Ernst F.: *Beitrag zur Analyse und zur Dimensionierung von Kompondern anhand einer einheitlichen Beschreibungsweise*. Dissertation Universität Duisburg, 1989
- [7] Fa. Shure Inc.: Beschreibung des Verfahrens *Audio Reference Comping*. <http://www.shure.com/wireless/slx/arc.asp> (25.05.2004)
- [8] ter Haseborg, Jan Remmer: *Untersuchung und Implementierung von Kompanderverfahren für eine Audiodatenübertragung*. Diplomarbeit Technische Universität Hamburg-Harburg, 2003
- [9] Warstat, Michael / Görne, Thomas: *Studiotechnik – Hintergrund- und Praxiswissen*. Elektor-Verlag, Aachen, 2002. 5. Auflage
- [10] Zölzer, Udo: *Digitale Audiosignalverarbeitung*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1997. 2. Auflage
- [11] Zwicker, Eberhard / Fastl, Hugo: *Psychoacoustics – Facts and models*. Springer, Hamburg/Berlin, 1999. 2. Auflage

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Detmold, 9. September 2004