SilverPhones - ein Kopfhörersystem mit digitaler Signalverarbeitung für Menschen mit leichter Hörminderung

Dieter Leckschat, Christian Epe, Jan Selzer

Hochschule Düsseldorf / University of Applied Sciences, dieter.leckschat@hs-duesseldorf.de

Kurzfassung

Die Zahl von Menschen, die unter einer beginnenden oder minder schweren Hörstörung leiden, geht allein in Deutschland in die Millionen. Die Versorgung mit Hörhilfen und insbesondere deren Anpassung ist sehr kostspielig, zeitintensiv und aufwändig. Daraus entstand die Motivation, ein sehr einfach zu bedienendes Gerät zu entwickeln, welches die Standard-Algorithmen von Hörgeräten für eine Kopfhörerwiedergabe implementiert. Dabei wird die Parametrierung, etwa die Einstellung von Zeitkonstanten bei der Dynamikkompression, mithilfe weniger fester Presets vorgenommen. Im Fokus liegen dabei die drei Anwendungsbereiche Sprache, Musik und Film. Plattform für die Signalverarbeitung ist ein kompaktes Raspberry Pi – Rechnersystem, welches niedrige Kosten mit hoher Leistungsfähigkeit verbindet und akkubetrieben mobil einsetzbar ist.

Motivation und Einführung

Viele Millionen Älterwerdende ("Silver Generation") sind in einer Lebensphase, in der sie ein nachlassendes Gehör feststellen, aber (noch) nicht bereit sind, Hörgeräte zu tragen. Hintergrund ist etwa die immer noch vorhandene Stigmatisierung von Hörgeräte-Technologie. Weiterhin sind die Kosten für Hörtechnik bedingt durch die Strukturen im Gesundheitswesen hoch. Begründen lassen sich die hohen Preise auch mit der in der Tat meist aufwändigen Anpassung. Gerade miniaturisierte Technik ist für die Zielgruppe häufig auch kompliziert in der Handhabung, wie Beoachtungen zeigen. All dies erzeugt die Motivation, für Anwendungen wie Musikhören und Film eine Hörunterstützung zu entwerfen, die niederschwellig einsetzbar, sehr einfach zu bedienen und dazu kostengünstig ist.

Systemkonzept

Entwicklungsaufgabe war also die Konzeption und der Aufbau eines Kopfhörersystems für die Zielgruppe. Hierzu wurde als Signalverarbeitungs-Plattform der leistungsfähige und preisgünstige "Kleinrechner" Raspberry Pi verwendet. Da dieser zunächst ohne ein Audiointerface zur Verfügung steht, musste ein solches passend zum Betriebssystem ergänzt werden. Die Wahl fiel auf ein kommerziell erhältliches USB-Audiointerface mit zwei Linepegel-Eingängen und –Ausgängen, und einem Störabstand von 89dB(A), der hier als ausreichend betrachtet werden kann. Eigens entwickelt wurde ein einfacher aber leistungsfähiger Kopfhörerverstärker, da – ebenfalls speziell in der hier zu entwickelnden Applikation – eine hohe Ausgangsspannung benötigt wird. Erreicht werden lastabhängig etwa $10V_{ss}$.

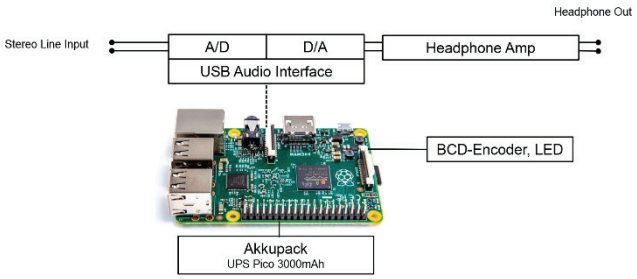

Abbildung 1: Blockschaltbild der Hardware

Um eine Nutzung möglichst auch portabel zu ermöglichen, wurde das System durch einen Akkupack vervollständigt, der mindestens eine Spielfilmlänge durchhalten sollte und mit dem unter Realbedingungen circa vier Stunden drahtloser Betrieb möglich ist.

Technischer Systemaufbau: Software

Der Raspberry Pi – Rechner wird standardmäßig mit einem speziell auf ihn zugeschnittenen Betriebssystem "Raspbian" betrieben, welches auf einer Micro-SD Speicherkarte einfach integriert werden kann. Als Applikation unter diesem Betriebssystem läuft hier die Software "Pure Data (PD) extended". Diese enthält einfache Signalrouting- und Verarbeitungsfunktionen, die allerdings für unsere Applikation nicht ausreichend sind. Daher wurde von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, sogenannte "Externals" einzubinden. Dies sind Programmteile, die in der Programmiersprache C geschrieben werden; es kamen ein weitgehend parametrierbarer Dynamikkompressor sowie ein Digitalfilterblock zum Einsatz.

Um Peripherie-Anschlüsse (GPIO-Pins) des Rechners nutzen zu können, zum Beispiel um LED´s anzusteuern oder Eingaben zu machen, wird die "WiringPi Library" Softwarebibliothek benötigt. Insbesondere muss der Programmwahlschalter, ein BCD-Enkoder, abgefragt werden.

Schließlich muss ein Ausschalten des Geräts möglich sein, ohne dass Daten verloren gehen bzw. Dateien beschädigt werden ("File-safe shutdown"). Dies wird trotz laufendem Betriebssystem beim Raspberry Pi ermöglicht.

Benutzungsoberfläche

Als sehr wichtig wurde, wie oben beschrieben, eine wirklich einfache Bedienung des Geräts betrachtet. Resultierend gibt es eigentlich nur zwei Bedienelemente: Einen Lautstärkeregler und einen Programmwahlschalter (Abbildung 2). Hinzu kommen Ein- und Ausschalter.

Den Nutzern wird eine einseitige Anleitung an die Hand gegeben, die ebenfalls in einfacher Sprache geschrieben ist und auf die drei Anwendungsfelder

- Sprache
- Musik
- Film

hinweist. Innerhalb jeder Kategorie gibt es drei unterschiedliche Presets, die vom Nutzer nicht verändert werden können; es wird ausprobiert und dann das bevorzugte Programm verwendet. Eine zehnte Einstellung ermöglicht linearen Betrieb ohne Signalbearbeitung.

Abbildung 2: Das fertig aufgebaute “Silverphones”-System

Die folgenden Tabellen geben die Programm-Presets wieder, zunächst als Übersicht in Abbildung 3. Einzelheiten zu den jeweiligen Signalbearbeitungen finden sich in den Abbildungen 4 bis 6. Wie oben beschrieben kommen hier unterschiedliche Kombinationen von Filtern und Dynamikkompression zum Einsatz. In den Filmtonprogrammen wird die Mid/Side-Technik implementiert, da davon ausgegangen werden kann, dass in aller Regel in Filmtonmischungen der Dialog in die Mitte gelegt wird.

Programmnummer	*Programmbezeichnung*	*Programmbeschreibung*
0	IN = OUT	Keine Funktion, Eingangssignal wird unverändert ausgegeben.
1	Sprache I „Silbenkompression“	Ziel: Verbesserte Sprachverständlichkeit
2	Sprache II „SV-Bell Filter“	
3	Sprache III „Silbenkompression + SV-Bell Filter“	
4	Musik I „Automatic Gain Control“	Ziel: Verringerte Dynamik um leise Passagen u. Anteile besser hörbar zu machen
5	Musik II „Automatic Gain Control + Dynamikkompression (leicht)“	
6	Musik III „Automatic Gain Control + Dynamikkompression (stark)“	
7	Film I „Nebengeräuschunterdrückung“	Ziel: Reduzierung der Störsignale und Verbesserung der Sprachverständlichkeit
8	Film II „Nebengeräuschunterdrückung + Dynamikkompression Sprache“	
9	Film III „verstärkte Nebengeräuschunterdrückung + Dynamikkompression Sprache“	

Abbildung 3: Übersicht über die einstellbaren Presets mit Kurzbeschreibung der jeweiligen Signalverarbeitung

#1 Sprache I „Silbenkompression“

- 3-Bandfilterung, Trennfrequenzen: 400 Hz, 4 kHz
- Kompression des mittleren Frequenzbandes (400 – 4k Hz), Parameter: Threshold *-20 dB*, Ratio *1/3*, Attack: *12 ms*, Release *30 ms*

#2 Sprache II „SV-Bell Filter“

- Kompression des Gesamtsignals, Parameter: Threshold *-30 dB*, Ratio *1/2*, Attack: *50 ms*, Release *90 ms*
- Filterung: Typ *Bell*, nach *Chebyshev*, Grenzfrequenz *2 kHz*, Güte *0,7*, Anhebung *9 dB*

#3 Sprache III „Silbenkompression + SV-Bell Filter“

- 3-Bandfilterung, Trennfrequenzen: 400 Hz, 4 kHz
- Kompression des mittleren Frequenzbandes (400 – 4k Hz), Parameter: Threshold *-30 dB*, Ratio *1/3*, Attack: *12 ms*, Release *30 ms*
- Filterung des mittleren Frequenzbandes (400 – 4k Hz): Typ *Bell*, nach *Chebyshev*, Grenzfrequenz *2 kHz*, Güte *0,7*, Anhebung *9 dB*

Abbildung 4: Programme 1-3 für Sprachwiedergabe

#4 Musik I „Automatic Gain Control“ – Umsetzung mit Kompressor

- Kompression des Gesamtsignals, Parameter: Threshold *-30 dB*, Ratio *1/2*, Attack: *200 ms*, Release *520 ms*
- Anhebung des Gesamtsignals um *6 dB* (Make-Up-Gain)

#5 Musik II „Automatic Gain Control + Dynamikkompression (leicht)“

- Kompression des Gesamtsignals, Parameter: Threshold *-30 dB*, Ratio *1/2*, Attack: 200 *ms*, Release *520 ms*
- Kompression des zuvor komprimierten Gesamtsignals, Parameter: Threshold *-33 dB*, Ratio *1/3*, Attack: *50 ms*, Release *100 ms*
- Anhebung des Gesamtsignals um ca. *15 dB* (Make-Up-Gain)

#6 Musik III „Automatic Gain Control + Dynamikkompression (stark)“

- Kompression des Gesamtsignals, Parameter: Threshold *-30 dB*, Ratio *1/2*, Attack: *200 ms*, Release *520 ms*
- Kompression des zuvor komprimierten Gesamtsignals, Parameter: Threshold *-33 dB*, Ratio *1/4*, Attack: *40 ms*, Release *80 ms*
- Anhebung des Gesamtsignals um ca. *18 dB* (Make-Up-Gain)

Abbildung 5: Programme 4-6 für Musikwiedergabe

#7 Film I „Nebengeräuschunterdrückung“

- Trennung des Signals mittels des MID-Side-Verfahrens (Mid = [L + R] / 2; Side = [L - R] / 2)
- Abschwächung des Side-Signals um *6 dB*

#8 Film II „Nebengeräuschunterdrückung + Dynamikkompression Sprache“

- Trennung des Signals mittels des MID-Side-Verfahrens (Mid = [L + R] / 2; Side = [L - R] / 2)
- Abschwächung des Side-Signals um *6 dB*
- Kompression des Mid-Signals, Parameter: Threshold *-30 dB*, Ratio *1/3*, Attack: *30 ms*, Release *60 ms*

#9 Film III „verstärkte Nebengeräuschunterdrückung + Dynamikkompression Sprache“

- Trennung des Signals mittels des MID-Side-Verfahrens (Mid = [L + R] / 2; Side = [L - R] / 2)
- Filterung des Side-Signals: Typ *Tiefenshelving*, nach *Chebyshev*, Grenzfrequenz *250 Hz*, Güte *1*, Abksenkung *12 dB*
- Kompression des Mid-Signals, Parameter: Threshold *-30 dB*, Ratio *1/3*, Attack: *30 ms*, Release *60 ms*

Abbildung 6: Programme 7-9 für Filmton-Wiedergabe

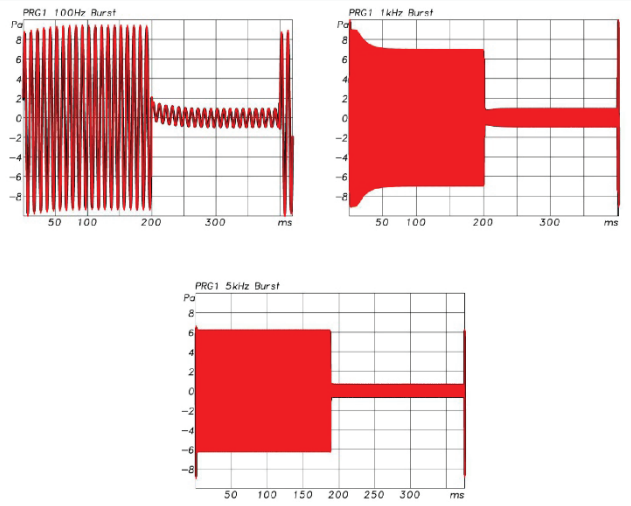

Abbildung 7: Messungen mit Sinusburstsignalen unterschiedlicher Grundfrequenz (Programm 1)

Messungen

Zur Verifikation der Implementierungen wurden zu jedem Programm Audiomessungen durchgeführt, auch um die Gültigkeit der eingestellten Parameter wie z.B. Filterverläufe zu bestätigen. Exemplarisch seien hier zwei Messergebnisse gezeigt: Abbildung 7 lässt erkennen, dass im (Sprach-) Programm 1 die mittleren Frequenzen einer Dynamikkompression unterzogen werden. Zu deren Untersuchung werden Burstsignale unterschiedlicher Frequenz verwendet und die Systemantwort aufgezeichnet. So lassen sich die Zeitkonstanten ´Attack´ und ´Release´ des Regelvorgangs ablesen.

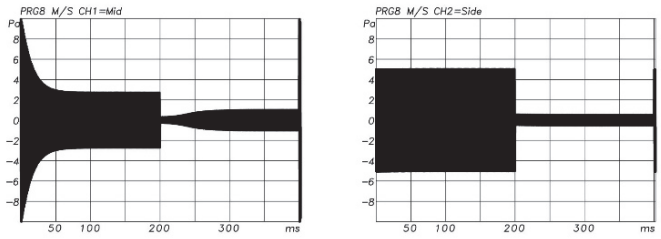

Abbildung 8: Dynamikkompression nur auf dem Mid-Kanal (Filmton-Programm 8)

In der Abbildung 8 ist gut zu erkennen, dass eine Zerlegung nach dem M/S-Verfahren eine getrennte Bearbeitung beim Filmton erlaubt. Während Sprachdialoge üblicherweise in die Mitte des Panoramas gemischt werden, ist Filmmusik meist als Stereosignal vorhanden und auch Atmo-Sounds sind eher seitlich oder räumlich breit gefächert vorhanden. So kann der Dialog gefiltert und/oder komprimiert werden, um eine Sprachverständlichkeit zu erhöhen, während "Nebengeräusche" im Pegel geschwächt und so mehr oder weniger unterdrückt werden.

Praktische Erprobung

Bis zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung konnten erste informelle Nutzertests durchgeführt werden, während eine Studie mit statistisch stichhaltiger Auswertung noch folgen soll. Die wenigen Probanden berichten von einer subjektiv stark verbesserten Sprachverständlichkeit und geringerer Höranstrengung. Die Sprach-Programme scheinen demnach erfreulicherweise die Zielsetzung zu erreichen.

Bei den Musikprogrammen gibt es naturgemäß eine recht starke Wechselwirkung zwischen Genre/Musiktitel und gewähltem Preset. So findet man meist ein Silverphones-Preset, das gut funktioniert, aber bei einem anderen Musikstück kann sich das Blatt wenden. Insgesamt funktionieren die Algorithmen, es scheint hier noch Potential für Parameter-Optimierungen zu sein.

Bei den Filmton-Presets äußerten Testhörer keine merkbaren Verbesserungen. Da prinzipiell, abhängig vom Pegel, eine durchaus starke Signalbearbeitung stattfindet, wird hier den Ursachen noch nachgegangen werden müssen.

Zusammenfassend wird dem Kopfhörersystem eine gute Ergonomie und ein definitiver auditiver Nutzen bescheinigt.

Ausblickend kann auf eine zukünftige, breiter angelegte Studie hingewiesen werden, die zu einer Optimierung der Algorithmen-Parameter führen soll.

Literatur

[OTECH] http://www.opentechguides.com/how-to/article/raspberry-pi/5/raspberry-pi-auto-start.html, Stand: 13.06.2015

[BAU15] D. Bau: Erstellung einer Bibliothek für Audio-Algorithmen auf der Raspberry Pi-Plattform. Bachelor-Thesis, Hochschule Düsseldorf. 2015.

[MLW04] H. Meister, I. Lausberg, H. von Wedel, M. Walger: Untersuchung von Faktoren bei der Erstversorgung mit Hörgeräten. Ergebnisse einer Pilotstudie. Originalien, HNO Vol. 52, Issue 9, S. 790ff. 2004. Zu finden unter: http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00106-003-0987-7, Stand: 12.09.2015

[PD] Pure Data Homepage: https://puredata.info, Stand: 08.09.2015

[PD-DEB] PD, FAQ for Debian, http://puredata.info/docs/faq/debian, Stand: 08.09.2015

[PD-RAS] PD, Building for Raspbian: https://puredata.info/docs/developer/BuildingPdExtendedForRaspberryPiRaspbianWheezyArmhf, Stand: 08.09.2015

[UNOLD] Universität Oldenbug, Fakultät VI – Medizin und Gesundheitswissenschaften, Department für Medizinische Physik und Akustik, Vorlesungsskript Audiologie. http://www.uni-oldenburg.de/mediphysik-akustik/mediphysik/lehre/vorlesungen/download-lecture-scripts/, Stand: 28.04.2015

[WIPI] http://wiringpi.com/download-and-install/, Stand: 13.06.2015