

Ein nichtlineares Basilmembran-Filter mit modifiziertem Phasengang zur Simulation von Maskierungsschwellen von Schroederphasen-Tonkomplexen

Eugen Rasumow* und Martin Hansen*

*Institut für Hörtechnik und Audiologie, Jade Hochschule, D-26121 Oldenburg, Email: Eugen.Rasumow@web.de

I. Einleitung

Der Phasengang auditorischer Filter ist ein bisher wenig untersuchtes Gebiet innerhalb der Psychoakustik. Ein möglicher Grund dafür ist, dass der Phasengang per se psychophysisch nicht messbar ist. Allerdings lassen sich die Auswirkungen des Phasengangs bestimmter Stimuli auf die Maskierung innerhalb psychoakustischer Experimente beobachten. So ermöglicht die Interpretation der Experimente aus [1] und [2] mit harmonischen Tonkomplexen $x(t) = \sum_n \sin(n\omega t + \theta(n))$ mit variabler Schroederphase gemäß $\theta(n) = C \cdot \frac{\pi n(n-1)}{N}$ Rückschlüsse auf die zweite Ableitung der Phase nach der Frequenz des auditorischen Filters mit $f_M = 2$ kHz. Daraus lässt sich wiederum eine mögliche Grundfunktion des Phasengangs folgern. Diese Studie setzt an der Schätzung der Phasengangskrümmungen aus [5] an, um diesen möglichen Phasengang innerhalb eines *DRNL*-Filters (**d**ual **r**esonance **n**onlinear-Filter, siehe z.B. [4]) zu implementieren. Dieses modifizierte *DRNL*-Filter wird in den folgenden Abschnitten anhand von Simulationen mithilfe des *CASP*-Modells [3] mit bestehenden *DRNL*-Filtern verglichen.

II. *DRNL*-Filter

Die in [5] beschriebenen Verfahren ermöglichen die Schätzung der zweiten Ableitung des Phasengangs nach der Frequenz in zwei charakteristischen Frequenzbereichen. Die Untersuchungen mit $f_M = 2$ kHz deuten auf eine Phasenkrümmung von $\frac{d^2\theta}{df^2} \approx -1.32 \cdot 10^{-5}$ rad/Hz² im Frequenzbereich für $1400 \text{ Hz} \leq f \leq 3200 \text{ Hz}$ (*on-frequency*) und eine Krümmung von $\frac{d^2\theta}{df^2} \approx +4.53 \cdot 10^{-6}$ rad/Hz² für $200 \text{ Hz} \leq f \leq 1400 \text{ Hz}$ (*off-frequency*). Diese zwei Krümmungen lassen sich, unter der Annahme, dass $\frac{d\theta(0)}{df}(0) = 0$ und $\theta(0) = 0$ zu einem möglichen

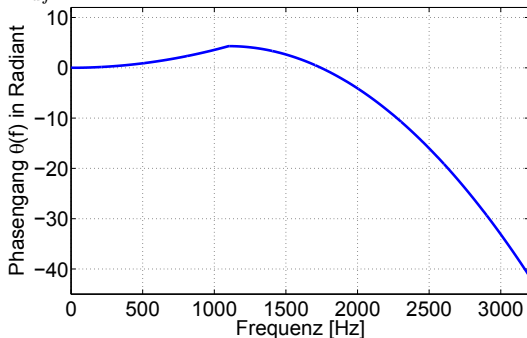


Abbildung 1: Möglicher Phasengang des auditorischen Filters mit der Filtermittenfrequenz $f_M = 2$ kHz. Der exakte Frequenzbereich des Übergangs beider Phasenkrümmungen ist nicht bekannt.

resultierenden Phasengang zusammenfügen¹ (siehe Abb. 1). Bisherige Untersuchungen mit Berücksichtigung der geschätzten Phasenkrümmung innerhalb linearer Basilmembran-Filter (weiterhin *BM*-Filter genannt) ermöglichen dabei nicht die korrekte Simulation des gemessenen Dynamikbereichs (siehe [6]). Aus diesem Grund wurde der Phasengang aus Abb. 1 in ein *DRNL*-Filter implementiert. Dazu wurde das *DRNL*-Filter aus [4] bezüglich der Phase modifiziert, wobei die Betragsübertragungsfunktion gleich gelassen wurde. Dieses modifizierte *DRNL*-Filter wird schematisch in Abb. 2 dargestellt. In der Anordnung des *DRNL*-Filters

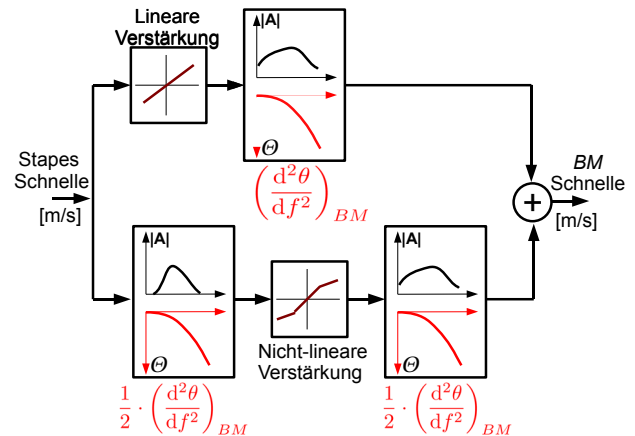


Abbildung 2: Eigene Modifikation eines *DRNL*-Filters, basierend auf [4] und [3]. Durch die zwei Filterstufen im nicht-linearen Filterzweig erhalten die Phasengänge dieser Filter jeweils die halbe der gewünschten Phasenkrümmungen $\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d^2\theta}{df^2}\right)_{BM}$.

aus Abb. 2 wurden im nicht-linearen Filterzweig alle Filterstufen vor und nach der Nicht-Linearität zu jeweils einem Filter und im linearen Filterzweig zu einem Gesamtfiler zusammengefasst². Die einzelnen Filter wurden als *FIR*-Filter 2048-ter Ordnung im nicht-linearen und als *FIR*-Filter 4096-ter Ordnung im linearen Filterzweig implementiert, damit die Grundverzögerung der beiden Filterzweige konstant bleibt. Andernfalls kann es bei der Summation beider Filterzweige zu unerwünschten Auslöschungseffekten kommen. Dieses *DRNL*-Filter wurde in der Simulationsumgebung nach [3] betrieben, wobei im Vergleich zu [3] das *BM*-Filter variiert wurde. Weiterhin diente als Modulationsfilter, anstatt einer gesamten Filterbank, stets nur ein Tiefpass mit der Grenzfrequenz $f_g = 8$ Hz.

¹Diese beiden Annahmen sind keineswegs trivial, sondern bedürfen weiterer Überlegungen. Eine Herleitung zu beiden Annahmen befindet sich in Abschnitt 2.1 in [5].

²Eine Variation der einzelnen Filterelemente und die Analyse der Konsequenzen ist in Kapitel 7 in [5] dargestellt.

III. Simulationsergebnisse

Die Analyse der *on-frequency* Experimente (siehe Abb. 3) ermöglicht eine Schätzung der Phasenkrümmung um die Filtermittenfrequenz f_M herum. Die Analyse der *off-frequency* Experimente (siehe Abb. 4) lässt Rückschlüsse über den Phasengang weit unterhalb f_M zu. Das Ziel ist, beide Experimente bezüglich der Lage der Maskierungsminima und der gemessenen Dynamik mithilfe eines *DRNL*-Filters simulieren zu können. Dazu muss dieses *DRNL*-Filter breitbandig die gemessenen Phaseigenschaften aufweisen. Abb. 3 stellt die gemessenen und simulierten *on-frequency* Experimente dar. Für die

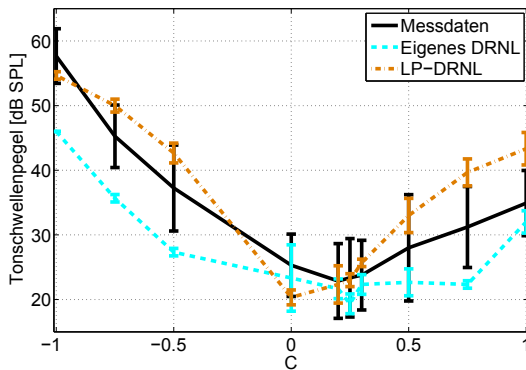


Abbildung 3: Gemessene Daten mit $f_0 = 50$ Hz aus [5] (durchgezogener Graph), die entsprechenden Simulationsdaten bei Verwendung des *DRNL*-Filters nach [4] (punkt-gestrichelter Graph) und die entsprechenden Simulationen bei Verwendung der eigenen *DRNL*-Filtervariante (gestrichelter Graph). Die x-Achse gibt den Vorfaktor C der Schroederphase des Maskierers an. Der Maskiererpegel betrug hierbei stets $L_{htc} = 75$ dB SPL.

Interpretation ist wichtig, dass der Phasengang des *BM*-Filters lediglich die Lage des Maskierungsminimums bestimmt (entlang der C -Achse) und keinen charakteristischen Einfluss auf die absolute Lage der einzelnen Pegel (entlang der y -Achse) besitzt. Hierbei wird deutlich, dass die Simulationen des *DRNL*-Filters nach [4] die Maskierungsminima stets bei $C_{min} \approx 0$ aufweisen. Dies ist eine Konsequenz nicht konstanter Phasenkrümmungen des *DRNL*-Filters im Frequenzbereich der Maskierer ($1400 \text{ Hz} \leq f \leq 3200 \text{ Hz}$ bzw. $200 \text{ Hz} \leq f \leq 1400 \text{ Hz}$). Die eigene *DRNL*-Filtervariante hingegen ermöglicht eine genauere Simulation des Minimums der gemessenen Schwellenwerte. Hierbei liegen jedoch die simulierten stets unterhalb der gemessenen Schwellen. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen könnten zu schmale Betragsübertragungsfunktionen der verwendeten *DRNL*-Filter sein. Die gemittelten Messwerte und Simulationsergebnisse der *off-frequency* Experimente werden in Abbildung 4 dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass lediglich die eigene *DRNL*-Filtermodifikation eine korrekte Simulation des Maskierungsminimums ermöglicht. Simulationen mithilfe des *DRNL*-Filters nach [4] ergeben, wie zuvor, $C_{min} \approx 0$. Die gemessene Dynamik der Schwellenpegel kann mithilfe beider verwendeten *DRNL*-Filter gut wiedergegeben werden. Insgesamt ergeben sich auch bei der Simulation der *off-frequency* Experimente zu niedrige Schwellen-

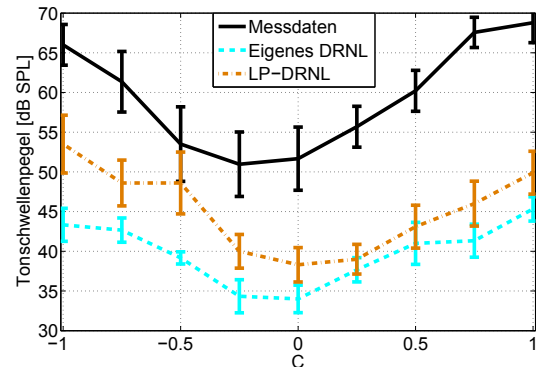


Abbildung 4: Vergleich der gemittelten Messdaten aus [5] (durchgezogener Graph) und der Simulationen mithilfe der eigenen *DRNL*-Filtervariante (gestrichelter Graph) und mithilfe des *DRNL*-Filters nach [4] (punkt-gestrichelter Graph). Die weitere Darstellung ist analog zu Abbildung 3.

pegel. Somit werden die Maskierer innerhalb der Simulationsumgebung im Vergleich zum Testton zu leise repräsentiert. Aus diesem Grund wird vermutet, dass die Betragsübertragungsfunktionen der verwendeten *DRNL*-Filter im Frequenzbereich $200 \text{ Hz} \leq f \leq 1400 \text{ Hz}$ zu wenig Maskiererleistung durchlassen bzw. zu steile Filterflanken aufweisen.

IV. Fazit

Die Einbindung der geschätzten Phasenkrümmungen in ein *DRNL*-Filter ermöglicht eine gute Simulation der gemessenen Phaseigenschaften. Sowohl die *on-frequency*- als auch die *off-frequency*-Phasenkrümmung verbessern die Performance eines *DRNL*-Filters innerhalb von Experimenten mit variabler Maskiererphase. Die Simulation von *off-frequency* Experimenten benötigt weitere Untersuchungen bezüglich der Betragsübertragungsfunktion auditorischer Filter in Kombination mit dem geschätzten Phasengang.

Literatur

- [1] A.J. Oxenham, T. Dau, Towards a measure of auditory-filter phase response. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110(6):3169-3177, 2001
- [2] A.J. Oxenham, S.D. Ewert, Estimates of auditory filter phase response at and below characteristic frequency, *J. Acoust. Soc. Am.* 117 (4):1713-1716, 2005
- [3] M.L. Jepsen, S.D. Ewert, T. Dau, A computational model of human auditory signal processing and perception *J. Acoust. Soc. Am.*, 124(1):422-438, 2008
- [4] E.A. Lopez-Poveda, R. Meddis. A human nonlinear cochlear filterbank. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110(6):3107-3118, 2001
- [5] E. Rasumow, Messung und Simulation der Maskierung von harmonischen Tonkomplexen mit Schroederphase auf Sinustöne. Masterarbeit, Institut für Hörtechnik und Audiologie, 2009
- [6] E. Rasumow, M. Hansen, Übertragungsfunktion der Basilmembran, Dresden; 673-674, DAGA 2008