

Hochschule der Medien
Nobelstraße 10, 70569 Stuttgart
Fakultät Electronic Media

Phase: DSP und Sounddesign

Josua Rath

**Prüfungsleistung im Modul:
Ton Seminar (221300a)**

vorgelegt von: Josua Rath (jr158)
Matrikelnummer: 5019326
Studiengang: Audiovisuelle Medien (AM7)
Datum der Abgabe: 31.07.2026

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation und Ziel	1
1.2	Definition	1
2	Phase in DSP	2
2.1	Phasengang von Filtern	2
2.2	Phasenspektrum	2
2.3	Allpassfilter	3
3	Phase im Sounddesign	4
3.1	Phaser- und Flangereffekt	4
3.2	Synthesizer und Phase	5
3.3	Dispersion	5
4	Entwicklung eines Plugins: PhaseToy	6
4.1	Hilbert-Transformation	6
4.2	Idee und Prototyp	7
4.3	Verbesserung und Anwendung	8
5	Fazit und Ausblick	9
	Quellenverzeichnis	10

1 Einführung

Phase gehört zu den grundlegenden Konzepten der Signalverarbeitung und der Audiotechnik. Obwohl sie in nahezu allen Bereichen der digitalen Audiotbearbeitung eine Rolle spielt, wird ihre Bedeutung häufig unterschätzt oder auf eine reine Zeitverschiebung reduziert. Während Pegel- und Frequenzänderungen meist unmittelbar wahrgenommen und visualisiert werden können, sind Phasenbeziehungen deutlich weniger intuitiv und ihre Auswirkungen oft erst im Zusammenspiel mehrerer Signale oder bei der Analyse von Filtern erkennbar.

1.1 Motivation und Ziel

Da dieses Thema unterschiedliche Fachgebiete umspannt, kann eine gelernte Intuition helfen, sich zu orientieren, verständigen und als Ingenieur informierte Entscheidungen zur Problemlösung zu treffen.

Zweck dieser Arbeit ist es, einen Überblick über technische und gestalterische Aspekte des Konzepts Phase zu vermitteln und deren Einsatzmöglichkeiten zu illustrieren. Es wird keine Erfahrung mit speziellen Werkzeugen oder Sounddesign und nur ein schmales mathematisches und physikalisches Grundwissen im Audiokontext vorausgesetzt. Abschließend wird das selbst entwickelte Audioeffekt-Plugin PhaseToy vorgestellt, welches aus Inspiration und Faszination am Thema Phase als vielseitiges Werkzeug zur Klanggestaltung entwickelt wurde.

1.2 Definition

Eine simple Definition für den Begriff Phase lautet:

Phase beschreibt die Position einer periodischen Schwingung innerhalb ihres Zyklus. Sie wird als Winkel ϕ in Grad oder Bogenmaß angegeben und steht in direktem Zusammenhang mit der Zeit über

$$\phi = \omega t$$

wobei $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz bezeichnet. Der Phasenunterschied zweier periodischer Signale gleicher Frequenz beschreibt deren relative Verschiebung innerhalb eines Zyklus.

2 Phase in DSP

Der Großteil der Audiotbearbeitung oder Signalverarbeitung allgemein passiert heute in der digitalen Domäne. Darum ist es hilfreich zu verstehen, wie sich Signale unter mathematisch idealisierten Bedingungen und mit mathematischen Operationen verhalten. Viele Aspekte aus der analogen Technik zum Thema Phase sind hilfreicherweise direkt übertragbar.

2.1 Phasengang von Filtern

Filter beeinflussen nicht nur die Amplitude, sondern auch die Phasenverschiebung von unterschiedlichen Frequenzen. Wie ein Signalkettenglied die Phase eines Signals beeinflusst, kann man in einem Phasendiagramm angeben, auf dem die Frequenz gegen die Differenz der Phase vom Eingang zum Ausgang gezeichnet wird. Der Phasenunterschied wird meist im Bereich zwischen -180° und 180° (wrapped Phase) angegeben, auch wenn der tatsächliche Unterschied größer als ein Zyklus ist, weil die Phase modulo 2π definiert wird. Akkurat angegeben werden kann dieser Phasenunterschied nur nach dem Einschwingvorgang einer spezifischen Frequenz. Der Verlauf des Phasengangs hängt davon ab um welche Art von Filter es geht. Eine reine zeitliche Verzögerung durch ein Delay oder einen linearphasigen Filter führt zu einer Gerade im Phasengang, da der Phasenversatz proportional zur Frequenz ist. Für die tatsächliche Verzögerung, die von einem Filter bei einer Frequenz ausgelöst wird, ist die negative Steigung des Phasengangs über die Frequenzen, genannt Gruppenlaufzeit, verantwortlich: $\tau_g = -\frac{d\phi}{d\omega}$. Je größer die negative Steigung des Phasengangs, desto größer ist die Gruppenlaufzeit.

2.2 Phasenspektrum

Das Ergebnis einer Fouriertransformation ist wie man in der Signallehre lernt ein Frequenz-Amplituden-Spektrum. Diese Auffassung ist zwar nicht falsch, lässt aber eine wichtige Komponente weg: Das Phasenspektrum. Bei einer Fouriertransformation erhält man eine reelle und eine imaginäre Spektralkomponente, die 90° Phasendifferenz zueinander haben. Aus dem Betrag dieses komplexen Spektrums berechnet sich die Amplitude und der Winkel (zur positiven reellen Achse) bestimmt die Phasenlage. Ohne diese Information wäre die Fouriertransformation nicht eindeutig umkehrbar. Ein Amplitudenspektrum allein kann also noch nicht jede beliebige Wellenform repräsentieren. In der Audiotechnik wird diese

Phaseninformation in Spektrogrammen oder ähnlichen Werkzeugen oft nicht dargestellt oder verwendet. Grund dafür könnte sein, dass die Phaseninformation im Echtzeitkontext schwer zu interpretieren ist. Moderne Werkzeuge wie MiniMeters' Spektrogramm nutzen zusätzlich Phaseninformation, um die Zeit-Frequenz-Darstellung zu schärfen.

2.3 Allpassfilter

Bei dieser speziellen Art von Filtern werden alle Frequenzen mit unverändertem Pegel durchgelassen. Allpassfilter besitzen einen konstanten Amplitudengang und einen frequenzabhängigen Phasengang. Es gibt unterschiedliche Arten von Allpassfiltern, jedoch sind meistens, wenn von einem Allpass die Rede ist, Filter erster und zweiter Ordnung gemeint (Phasengang siehe Abbildung).

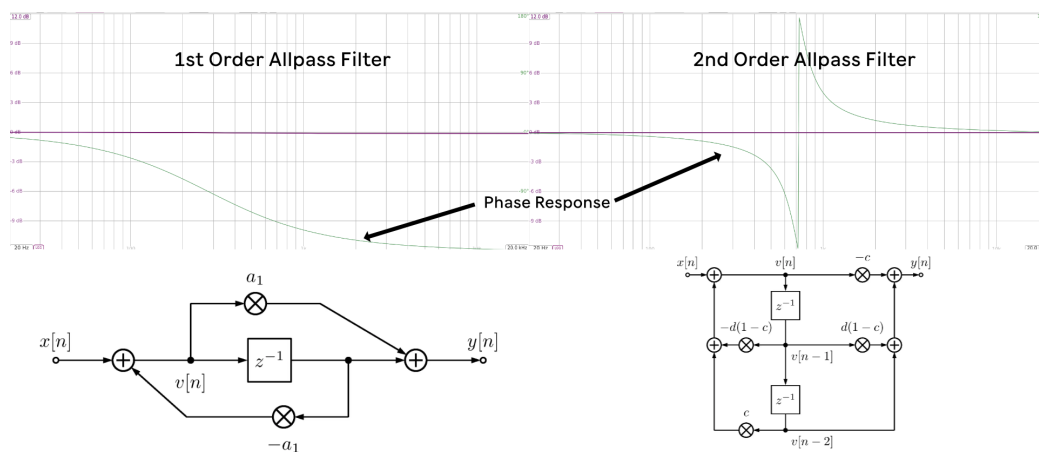


Abbildung 1: Phasengang und Schaltplan von Allpassfiltern

Diese sind in ihrer Implementierung sehr effizient, da sie rekursiv aufgebaut sind. Viele andere Filtertypen wie z.B. Bandpass-, Hoch-/Tiefpass- und Kerbfilter können aus Allpassfiltern zusammen mit dem unveränderten Signal erstellt werden (siehe Abbildung).

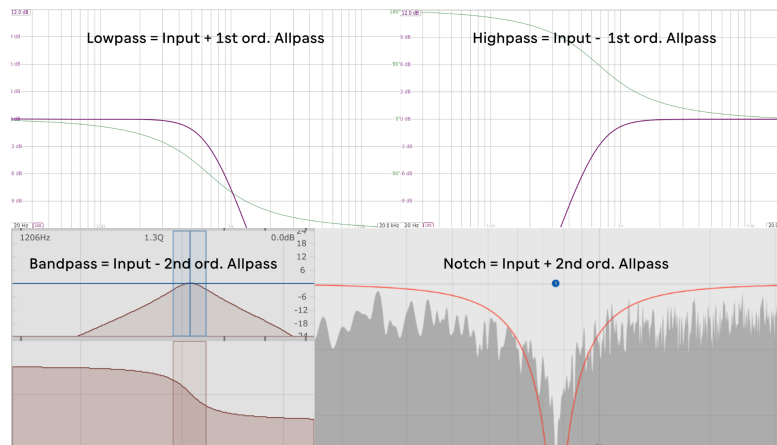


Abbildung 2: Verschiedene Filter können aus Allpassfiltern gebaut werden.

Allpässe finden auch Anwendung in der Übertragungs- und Beschallungstechnik z.B. als Phasenentzerrungs-, Zeitangleichungs- und Transient-Shaping-Glied. Sie eignen sich um fraktionale Verzögerungen (kein Vielfaches eines Sampling-Intervals) in Delay Lines zu erzielen. Außerdem nutzen viele moderne digitale Hall-Algorithmen Allpassfilter für ihre frequenzabhängige Verzögerung. Mehr zu speziellen Anwendungen von Allpassfiltern steht in Kapitel 3.

3 Phase im Sounddesign

Obwohl Phasenänderungen für sich genommen häufig nicht direkt hörbar sind, bilden sie die Grundlage zahlreicher Audioprozessoren. Durch die Kombination phasenverschobener Signalanteile entstehen Interferenzen, die gezielt zur Klangformung eingesetzt werden. Die folgenden Abschnitte zeigen einige dieser Anwendungen im Sounddesign.

3.1 Phaser- und Flangereffekt

Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, können Allpassfilter dazu verwendet werden um Notch-(Kerb-)filter zu erstellen. Reiht man mehrere dieser Notchfilter hintereinander und moduliert ihre Mittenfrequenz erhält man den klassischen Phasereffekt. Dieser wird schon seit Jahrzehnten verwendet als Gitarreneffekt oder um Stereobreite in ein Mono-Quellsignal zu bringen, indem die Filter links und rechts unterschiedlich moduliert werden. Sehr ähnlich dazu ist der Flanger, dieser

verwendet ein kurzes Delay und erzeugt somit einen Kammfilter wenn er mit dem Eingangssignal addiert wird. Der Flanger ist wegen seiner technischen Simplizität schon in den 1950er Jahren in Musikstücken verwendet worden. In moderner Musikproduktion zählen diese Effekte zum Standard. Futuristisches Sounddesign lässt sich in Teilen fast ausschließlich auf Interferenzeffekte zurückführen und ganze Genres bauen auf diesen beiden Effekten auf.

3.2 Synthesizer und Phase

Bei Synthesizern gibt es oft die Möglichkeit Oszillatoren zu modulieren. Zwei typische Modulationsarten sind Phasenmodulation und Frequenzmodulation. Dabei wird die Phase bzw. Frequenz eines Oszillators über eine andere Modulationsquelle gesteuert. Frequenz ist die zeitliche Ableitung der Phase. Über diese Modulation können recht einfach sehr komplexe Obertonstrukturen erzielt werden. Moderne Digitalsynthesizer wie *Serum* (Xfer Records) oder *Vital* (Vital Audio) bieten neben den genannten Modulationsmodi die Möglichkeit die Wellenformen der Oszillatoren in Wavetable-Editoren auf interessante Weise neu zu formen. In *Serum* lassen sich beispielsweise die Phasen der Obertöne individuell anpassen, was drastische oder subtile Änderungen in der Klangfarbe und im Spitzenpegel bewirken kann. Wird die Phase aller Frequenzen einer Sägezahn- oder Rechteckwellenform um 90° rotiert, ändern sich die Wellenform und der Spitzenpegel allerdings gibt es keinen wahrnehmbaren Klangunterschied. Die Wellenformen verhalten sich aber sehr unterschiedlich, wenn sie durch Verzerrung u.ä. weiterverarbeitet werden. Diese Phasenbearbeitung kann somit eingesetzt werden, wenn der akustische Fingerabdruck der Ausgangswellenform nicht im Vordergrund stehen soll.

3.3 Dispersion

Im physikalischen Sinne beschreibt dieses Phänomen die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit durch ein Medium in Abhängigkeit der Frequenz. Dies führt dazu, dass scharfe Transienten, die normalerweise breitbandig sind über die Zeitverzögerung der unterschiedlichen Frequenzkomponenten unscharf oder "verschmiert" ankommen. Diese Eigenschaft kann digital über kaskadierte Allpassfilter approximiert werden, wie zum Beispiel in dem Effekt *Disperser* Effekt von Kilohearts. Wenn tiefe Frequenzen stärker verzögert werden als hohe, kommt es zu einem klassischen Chirp oder Laser-Soundeffekt bei Transienten. Diese Technik ist in der elektronischen Musikproduktion in Genres wie Dubstep und Color

Bass sehr populär geworden, um einen Klang zu erzeugen, der oft als "wässrig" beschrieben wird, mit dem auch Akzente gesetzt werden können. Dadurch, dass die Energie von Impulsen zeitlich ausgebreitet wird ist der maximale Pegel von perkussiven Klängen nach der Dispersion tendenziell geringer. Man hört Dispersion auch bei Federhall sehr deutlich, da die Wellengeschwindigkeit in der Feder frequenzabhängig ist. Hier wird die temporale Streuung in einer Rückkopplungsschleife immer stärker und erzeugt so einen diffusen Nachhall.

4 Entwicklung eines Plugins: PhaseToy

Dieses Kapitel ist eine Dokumentation eines persönlichen Projekts des Autors und nimmt deshalb gelegentlich die Ich-Perspektive an.

Schon seit geraumer Zeit war ein persönliches Projekt von mir ein Plugin-Effektgerät für Ableton zu entwickeln mithilfe der mitgelieferten Programmierungsumgebung MAX for Live. Es stellte sich jedoch als schwierig heraus eine Idee für einen interessanten Effekt zu finden, der nicht einfacher mit bereits existierenden Werkzeugen erzielt werden kann. Das Konzept, welches das ändern sollte, führe ich im Folgenden aus.

4.1 Hilbert-Transformation

Die Mathematik in der Signaltheorie (z.B. Fourieranalyse, siehe 2.2) enthält häufig komplexe Zahlen, also Zahlen, die auf zwei zueinander orthogonalen (unkorrelierten) Achsen liegen. Die Konsequenz ist, dass Signale ebenfalls aus komplexen Zahlen bestehen können, wobei die Hauptachse als reelle Achse und die orthogonale Achse als imaginäre Achse bezeichnet wird. Es existiert eine Transformation, die ein Signal so umwandelt, dass alle Frequenzen gleichermaßen um 90° zum Ursprungssignal verschoben sind ohne dabei die Amplitude zu verändern: Die sogenannte Hilbert-Transformation $H(f)(t) = \hat{f}(t)$. Die Zusammensetzung aus einem reellen Signal und demselben Signal nach dieser Transformation als Imaginärteil bezeichnet man als analytisches Signal. Dadurch wird die Phasenlage eindeutig definiert: $f_a(t) = f(t) + \hat{f}(t) \cdot j$. Man kann sich analytische Signale als rotierende Zeiger vorstellen, deren Länge und Winkel sich kontinuierlich ändern. Sie haben die Eigenschaft, dass ihr Betrag (die Länge des Zeigers) die momentane Amplitude bzw. Hüllkurve beschreibt und ihr Winkel zur reellen Achse die momentane Phasenlage angibt. Aus der Projektion des analytischen Signals auf eine frei dreh-

bare Achse lässt sich jeder mögliche Phasenwert interpolieren:

$$p(t, \phi) = f(t) \cdot \cos(\phi) + \hat{f}(t) \cdot \sin(\phi)$$

Ersetzt man den Parameter ϕ durch ein anderes Signal $g(t)$, ist das Ergebnis eine Phasenmodulation. Phasenmodulation ist entscheidend für die Übertragungstechnik von vielen drahtlosen Kommunikationsstandards, da sie, im Gegensatz zu Amplitudenmodulation, wesentlich weniger empfindlich auf (Amplituden-)Rauschen und Verzerrungen ist.

4.2 Idee und Prototyp

Als ich entdeckte, dass MAX for Live bereits ein Objekt zur Berechnung der Hilbert-Transformation bereitstellt, entstand die Idee, Phasenmodulation nicht nur auf Oszillatoren, sondern auf beliebige Audiosignale anzuwenden. Mich interessierte insbesondere, wie sich ein Signal anhört, wenn es seine eigene Phase moduliert. Mit dem ersten Prototyp konnte lediglich die Amplitude des modulierenden Signals skaliert werden. Der resultierende Klang erinnerte mich daran, dass es einen Effekt gibt, der sehr ähnlich klingt: *Phase Distortion* von Kilohearts. Ich hatte also zufällig das innere Funktionsprinzip dieses Plugins entdeckt. Das nächste Ziel war die Funktionen dieses Plugins so genau wie möglich nachzubauen und ggf. zu erweitern.



Abbildung 3: Phase Distortion (links) und die Nachahmung (rechts)

Ein relevanter Unterschied in der Klangfarbe dieser Verzerrung gegenüber Waveshaping ist, dass die Ausprägung der entstehenden Obertöne abhängig von der Bandbreite des modulierenden Signals ist. Dadurch lässt sich beispielsweise über einen Filter einstellen, wie harsch die Verzerrung ausfällt. Außerdem kann das modulierende Signal normalisiert werden, indem es durch seine eigene Hüllkurve dividiert wird, womit die Charakteristik der Verzerrung konstant bleibt unabhängig vom Eingangspegel.

4.3 Verbesserung und Anwendung

Nach einigen Iterationen der Parameterbereiche und Benutzeroberfläche wurde ein LFO als zusätzliche Modulationsquelle hinzugefügt und die gestalterischen Möglichkeiten deutlich erweitert. Parallel wurden Änderungen am Layout und Design der Nutzoberfläche ausprobiert. In der aktuellen Version (PhaseToy v0.2) hat das Plugin die gleichen Basisfunktionen wie in Phase Distortion, sowie einen weiteren Verzerrungsmodus, bei dem die momentane Phase des Modulationssignals anstatt seiner Wellenform das Eingangssignal moduliert, einen Stereo-LFO mit auswählbaren Wellenformen und Frequenz-/Sync-/Note-Modi, ein Regler, der es ermöglicht zwischen Phasen- und Amplitudenmodulation stufenlos zu interpolieren und eine Anzeige für das modulierende Signal.



Abbildung 4: Die Benutzeroberfläche von PhaseToy

Dieses Plugin kann für zahlreiche Effekte verwendet werden: Als Verzerrung (sowohl mit analogem als auch digitalem Charakter), als Vibrato oder Chorus Effekt, als Frequency Shifter, Ring Modulator, Tape Emulator oder sogar als sekundäre Synthesizer-Engine. Letzteres funktioniert dank eines MIDI-Eingangs, mit dem

der LFO auf Notenwerte gestimmt werden kann. Je nach Wahl des Modulators, dessen Frequenzbereich und der Stärke der Phasenrotation entstehen sehr unterschiedliche zeitliche und spektrale Veränderungen, wodurch sich mit derselben Signalstruktur zahlreiche klassische Audioeffekte realisieren lassen. Ein weiterer Vorteil gegenüber klassischem Waveshaping besteht darin, dass die Modulationsquelle frei gewählt werden kann. Neben dem Eingangssignal selbst lassen sich daher auch externe Signale über einen Sidechain-Eingang als Modulator verwenden. Dadurch wird beispielsweise eine Verzerrung möglich, deren Obertonstruktur durch ein Schlagzeugsignal gesteuert wird, während das eigentliche Eingangssignal eine Gitarre ist.

5 Fazit und Ausblick

Zum Thema Phase gibt es viele Details, die je nach Anwendungsbereich sehr wichtig sein können. Dazu gehören Filteranalyse, Filterdesign und technische Werkzeuge wie Analysatoren und die Übertragungstechnik. Methoden im Sounddesign nutzen schon lange Phasenunterschiede um interessante Klangfarben zu erzielen und wären in Zukunft nicht wegzudenken. Modernere Ideen, wie extreme Dispersion oder die Verwendung von analytischen Signalen führen zu einem größeren Spielraum an akustischer Wiedererkennbarkeit. Auch wenn die theoretischen Aspekte schon seit Jahrzehnten bekannt sind gibt es immer noch ungenutztes Potenzial, wie bei der Entwicklung von PhaseToy. Dieses Plugin und die genannten Sounddesign-Techniken sollen in Zukunft weiterentwickelt und weiter erforscht werden.

Quellenverzeichnis

- [1] Wikipedia Contributors. *All-pass filter*. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/All-pass_filter (besucht am 31.07.2026).
- [2] Wikipedia Contributors. *Gruppenlaufzeit*. 2025. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gruppenlaufzeit> (besucht am 31.07.2026).
- [3] Wikipedia Contributors. *Hilbert-Transformation*. 2026. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hilbert-Transformation> (besucht am 31.07.2026).
- [4] Wikipedia Contributors. *Phasengang*. 2025. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasengang> (besucht am 31.07.2026).
- [5] Julius O. Smith. *Introduction to Digital Filters with Audio Applications*. <http://www.w3k.org/books/>: W3K Publishing, 2007. ISBN: 978-0-9745607-1-7.
- [6] Jan Wilczek. „Allpass Filter: All You Need To Know“. In: *The Wolf Sound Blog* (2021).