



# Emulation analoger Kompressoren

## 1. Einleitung

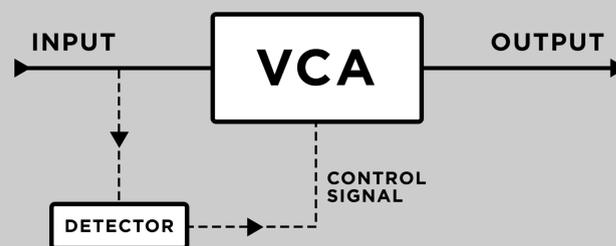
Die Emulation analoger Audiotechnik ist aus der modernen Audioproduktion nicht mehr wegzudenken. Besonders analoge Kompressoren wie der LA-2A, Fairchild 670 oder der UREI/UA 1176 gelten als klangliche Ikonen. Ihr analoger Klang wird mit Wärme, Charakter und Musikalität assoziiert. Allerdings sind diese Geräte teuer, selten und wartungsintensiv. Digitale Emulationen sollen diese Legenden für die DAW verfügbar machen, doch welche Schritte sind dafür notwendig? Und wie nah kommt die Software dem Original?

Diese Ausarbeitung beleuchtet die Funktionsweise analoger Kompressoren, stellt verschiedene Emulationsverfahren vor und diskutiert deren klangliche Authentizität im Vergleich zur Hardware. Es wird dabei ein grundsätzliches Verständnis der Handhabung und Funktionsweise von Audio-Kompressoren vorausgesetzt, dieses Vorwissen kann aber schnell erlangt werden, beispielsweise durch [Dan Worrall's "Guide to Compression"](#).

## 2. Wie funktioniert ein analoger Kompressor?

Der konzeptionelle Aufbau eines analogen Kompressors ist vergleichsweise einfach. In der analogen Audiosignalübertragung wird die Lautstärke des Signals durch die Amplitude der Spannung bestimmt. Um die Dynamik eines Signals zu reduzieren, muss diese daher adaptiv durch den Audio-Kompressor gedämpft werden.

Dabei wird das Eingangssignal vor dem eigentlichen spannungsreduzierenden Schaltkreis abgezweigt und einem Detektionsschaltkreis zugeführt, der den absoluten Spannungsausgang des Eingangssignals misst. Entsprechend der dadurch erzeugten Kontrollspannung wird die Spannung des Eingangssignals durch den spannungsreduzierenden Schaltkreis reduziert. Dabei finden je nach Kompressorarchitektur unterschiedliche Bauteile und letztlich unterschiedliche physikalische Effekte Verwendung. Während im abgebildeten Diagramm eine VCA (Voltage Controlled Amplifier) verwendet wird, um die eingehende Spannung und damit die Lautstärke des Signals zu reduzieren, gibt es auch Kompressoren, die hierfür Optokoppler, Röhren oder FETs (Feldeffekt-Transistoren) verwenden.

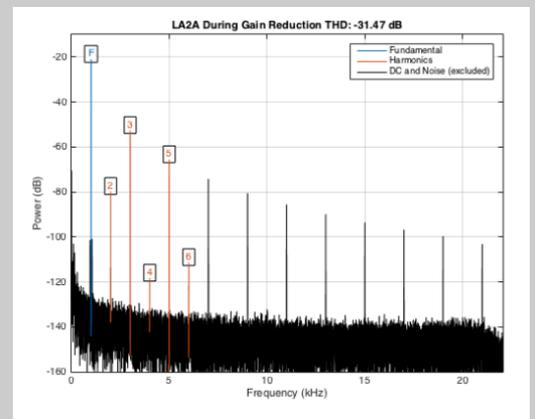


Anmerkung: Der Detektionsschaltkreis muss nicht zwangsweise vor dem SRS abgezweigt werden, beim "Feedback Design" wird die Kontrollspannung ermittelt, nachdem das Signal bereits ein erstes Mal durch den SRS gewandert ist.

### 3. Was macht analoge Kompression besonders?

Während ein einfacher Digitalkompressor lediglich das Signal komprimiert, möglicherweise mit linearen Attack- und Release-Zeiten, verhält sich ein analoger Kompressor entsprechend der darin verbauten Komponenten. Dabei wird das Eingangssignal in nicht-linearer Weise verändert, etwa durch:

- **Harmonische Verzerrung** – Entstehung zusätzlicher Obertöne im Audiosignal:
  - *Symmetrisch (ungerade Obertöne)* durch Clipping, also das Betreiben der verbauten Verstärker über deren Maximalspannung
  - *Asymmetrisch (gerade Obertöne)* durch Kennlinien von Röhren, Opto-Zellen, FETs, Dioden, etc.
  - Das Diagramm zeigt die harmonische Verzerrung einer 1 kHz Sinuswelle durch einen Teletronix LA-2A Kompressor.



- **Program-abhängiges Verhalten:**

Im Gegensatz zu digitalen Kompressoren, bei denen Attack- und Release-Zeiten, teils sogar Interpolationskurven, programmiert werden können, bieten analoge Kompressoren hier oft weniger Einstellmöglichkeiten. Dies liegt daran, dass sich die Bauteile in analogen Kompressoren je nach Bauart, Eingangsspannung und Parameterwahl unterschiedlich verhalten.

- **Zeitvariantheit:**

Auch Temperaturveränderungen und Alterung (z. B. in Kondensatoren, FETs, LDRs) beeinflussen das Verhalten des Geräts.



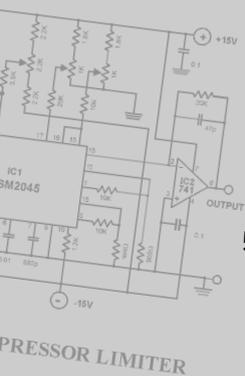
## 4. Emulationsverfahren

Da das eigentliche Komprimieren eines digitalen Audiosignals trivial ist, geht es bei der Emulation analoger Kompressoren vor allem darum, die in 3) genannten Verhaltensweisen nachzubilden. Dafür gibt es 2 grundsätzlich Verfahrensfamilien:

### 4.1 Whitebox Modelling

Hierbei wird das analoge Gerät anhand seiner Schaltung vollständig modelliert. Dafür sind mehrere Schritte notwendig:

1. **Schaltplananalyse** – Sofern vorhanden, werden die originalen Schaltpläne der zu emulierenden Hardware analysiert.
2. **Auswahl einer oder mehr "Golden Units"** – Diese Hardware Unit(s) dienen/dient bei der Emulation als Standard. Sie sollte dafür möglichst schaltplanakkurat sein und das gerätetypische Verhalten aufzeigen.
3. **Demontage und elektrotechnische Vermessung der einzelnen Geräte-Bauteile.**
4. **Aufstellen nichtlinearer Differenzialgleichungen** – Auf Basis der Schaltung und der vermessenen Bauteile wird ein mathematisches Modell erstellt. Dabei kommen Differenzialgleichungen zum Einsatz, die das zeitabhängige Verhalten von Strom und Spannung im System beschreiben. Da viele Bauteile wie z. B. Dioden oder Röhren nichtlinear arbeiten, ergibt sich ein nichtlineares Gleichungssystem, das das dynamische Verhalten des Kompressors möglichst realitätsnah abbildet.
5. **Simulation** – Beispielsweise mittels speziell für Schaltplansimulation konzipierter Software wie SPICE oder mittels mathematisch-physischer Modelle wie Wave Digital Filters oder State-Space Modelling.



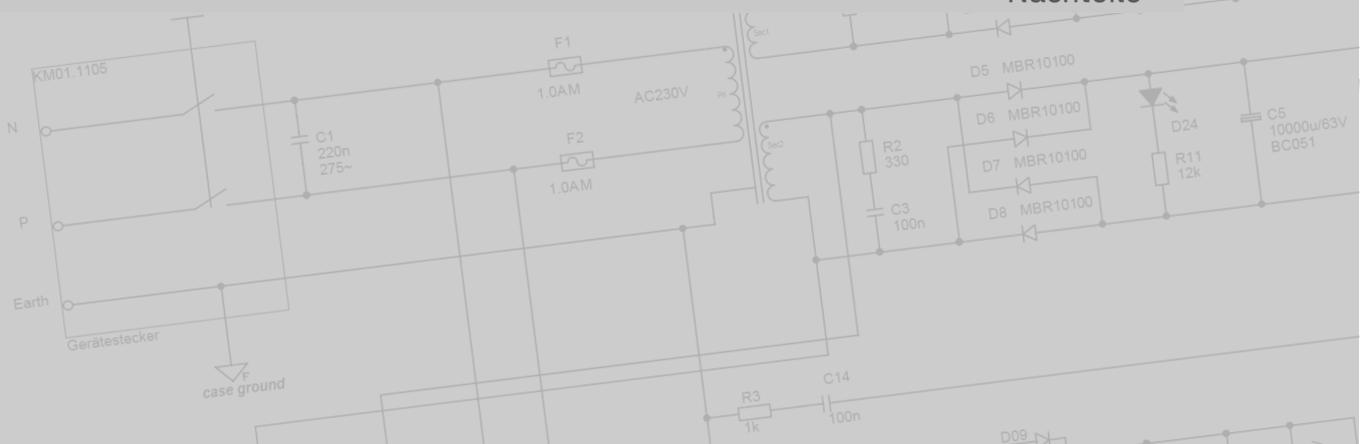
#### 4.1.1 Vor- und Nachteile des Whitebox Modellings

- Sehr akkurate Ergebnisse möglich
- Jedes Bauteil kann individuell angepasst werden
- Ergebnisse sind übertragbar
- Erleichterte Fehlersuche und Optimierung

Vorteile

- Entwicklung kann **etwas komplex werden...**
  - Erfordert tiefes Verständnis von Systemtheorie, Signalverarbeitung und Elektrotechnik
- Modelle erfordern hohe Rechenleistung
- Schwer realisierbar für unbekannte Schaltungen

Nachteile



## 4.2 Blackbox Modelling

Bei diesem Verfahren wird das Verhalten des analogen Geräts allein anhand der Analyse des Verhältnisses von Eingangs- zu Ausgangssignalen modelliert, meist ohne detaillierte Kenntnisse der internen Schaltung des Geräts.



1. **Testsignal-Design** – Unterschiedliche Eingangssignale (z. B. Impulse, Sinus-Sweeps oder Signale mit variabler Amplitude) werden durch das Gerät geschickt und sowohl das Eingangs- als auch das Ausgangssignal aufgezeichnet.
2. **Verhalten bei unterschiedlicher Konfiguration** – Um ein möglichst vollständiges Bild des Geräteverhaltens zu erhalten, wird das Gerät in verschiedenen Betriebszuständen (z. B. unterschiedliche Gain-, Attack-, Release-Werte) getestet.
3. **Verhaltensmodellierung** – Anhand der aufgezeichneten Daten wird ein mathematisches Modell erstellt, das den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignal abbildet. Dabei werden häufig Optimierungsverfahren (z. B. Levenberg-Marquardt) oder neuronale Netze eingesetzt.
4. **Inkrementelle Anpassung** – Das Modell wird in mehreren Schritten verfeinert, bis es das gemessene Verhalten möglichst genau reproduziert.
5. **Extrapolation variabler Parameter** – Um das Modell auch bei Parametereinstellungen zu nutzen, die nicht direkt vermessen wurden, erfolgt eine Interpolation bzw. Extrapolation zwischen bekannten Modellzuständen.

### 4.2.1 Vor- und Nachteile des Blackbox Modellings

- Akkurate Ergebnisse
- Relativ geringer Entwicklungsaufwand
- Gute Performanz

Vorteile

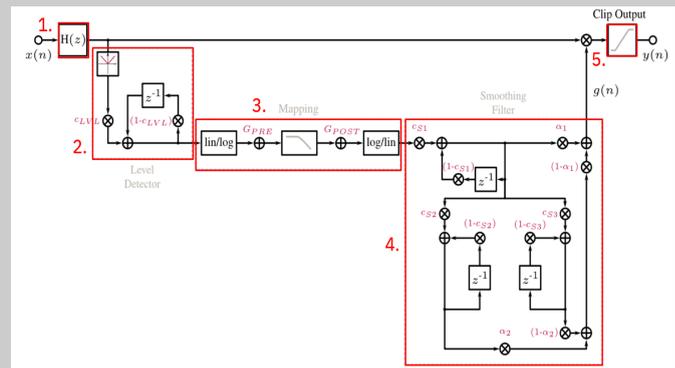
- Wenig flexibel
  - Je nach Verfahren keine Zugriff auf konkrete Parameter
- Modelle schwer modifizierbar
- Weniger präzise als Whitebox Modelling Verfahren
- Sehr abhängig von gesampelten Geräten
- Bei Geräten mit vielen Parametern kaum möglich

Nachteile

### 4.2.2 Beispiel eines Blackbox Modelling Verfahrens

In “Virtual Analog Modeling of Dynamic Range Compression Systems” (2017) beschreiben die Autoren ein konzeptionell vergleichsweise einfaches Verfahren zur Emulation analoger

Kompressoren. Hierbei wird ein generisches Modell eines digitalen Kompressors durch mehrere Optimierungsschleifen an ein analoges Referenzgerät angepasst. Das Diagramm zeigt dieses generische Modell. In Rot geschriebene Parameterwerte (e.g. **C\_LVL** oder **G\_PRE**) sind dabei Werte, die während der Optimierung angepasst werden können. Folgende Schritte sind für das Verfahren notwendig:



1. **Linearer Filter** – Zunächst wird ein Sinus-Sweep durch das zu emulierende Gerät geschickt. Aus dem Ausgangssignal lassen sich lineare Charakteristiken (Latenz, Frequenz- und Phasengang, etc.) des Geräts herausrechnen. Ein einfacher digitaler Filter simuliert im digitalen Modell dieses Verhalten.
2. **Level Detektor** – Dieser beschreibt, wie schnell und mit welchem Kurvenverhalten das analoge Gerät auf ein gegebenes Eingangssignal reagiert.
3. **Mapping Kurve** – An dieser Stelle im Modell findet die eigentliche Kompression statt. Hierfür werden Sinuswellen mit ansteigender Lautstärke durch das Referenzgerät geschickt und ermittelt, wie stark der Kompressor die Lautstärke reduziert. Durch Extrapolation zwischen den Testwerten kann eine Kurve erstellt werden, die Lautstärkereduktion durch den Kompressor beschreibt.
4. **Smoothing Filter** – Im Gegensatz zu einem analogen Gerät, können sich die durch das digitale Modell berechneten Werte theoretisch schlagartig ändern. Daher benötigt das Modell einen Glättungsfiler, der dieses Verhalten verhindert und dem analogen Gegenstück anpasst. Die Parameter werden in der Optimierungsroutine angepasst.
5. **Output Clipping** – Die Ausgegebene Lautstärke des analogen Geräts ist entsprechend den elektrotechnischen Gegebenheiten begrenzt, weshalb das mögliche Ausgangssignal des digitalen Modells durch eventuelles Clipping begrenzt wird.

Stark vereinfacht funktioniert das Verfahren nun wie folgt: Die im digitalen Modell änderbaren Parameter werden zunächst mit approximierten Werten befüllt. Jetzt werden unterschiedliche Testsignale durch das analoge Gerät und durch sein digitales Gegenstück geschickt. Durch die aufgenommenen Ausgangssignale lässt sich ein Fehlerwert bestimmen, der beschreibt, wie stark das Verhalten des digitalen Modells von dem des Referenzgeräts abweicht. Entsprechend werden die Parameter geändert. Dieser Schritt wird so lange ausgeführt, bis der Fehlerwert einen vernachlässigbaren Wert angenommen hat.

## 5. Emulation vs. Original

Nach der Betrachtung der Emulationsverfahren, die mitunter ziemlich komplex werden können, stellt sich aus Anwendersicht aber vor allem eine Frage: Lohnt sich dieser Aufwand? Können die Software-Äquivalente mit ihren 19"-Geschwistern mithalten? Mit diesen Fragen beschäftigte sich auch Klas Blomgren in seiner Bachelor-Arbeit "Comparision of Teletronix LA-2A and UAD 1176LN Hardware and Software [...]", in deren Rahmen unterschiedliche Messungen vorgenommen wurden:

- RMS-/Peak-Level
- Phasenauslöschung (Summierung von Hardware + invertierter Emulation)
- Attack-/Release-Zeiten
- Spektralanalyse
- Hörtests mit geschulten Hörern

Bei der Analyse der Ergebnisse stellte sich heraus, dass analytisch zwar Unterschiede zwischen Soft- und Hardware erkennbar sind, diese aber derart gering ausfallen, dass sogar erfahrene Nutzer der jeweiligen Hardware nur schwer Unterschiede bei separaten Testsignalen feststellen konnten. Im Kontext einer Mischung mehrerer Signale sind Hard- und Software daher nicht mehr differenzierbar.

---

## 6. Fazit

Digitale Emulation analoger Kompressoren ist ein technisch komplexes, aber mittlerweile sehr ausgereiftes Feld. Sowohl mit Whitebox-, als auch mit Blackbox-Modelling-Verfahren können heute Klangcharakter, Dynamikverhalten und Verzerrungen präzise nachgebildet werden. Zwar ersetzen sie nicht die Haptik und Aura der Originale, doch in der Praxis liefern sie den Sound legendärer, meist schwer verfügbarer Hardware „in the box“, flexibel, vergleichsweise günstig und zuverlässig.

## 7. Quellen

1. <https://producerhive.com/ask-the-hive/how-do-analog-plugin-emulations-work/>
2. [https://de.wikipedia.org/wiki/SPICE\\_\(Software\)](https://de.wikipedia.org/wiki/SPICE_(Software))
3. <https://cycling74.com/tutorials/demystifying-digital-filters-part-1>
4. [https://en.wikipedia.org/wiki/1176\\_Peak\\_Limiter](https://en.wikipedia.org/wiki/1176_Peak_Limiter)
5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic\\_range\\_compression](https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_range_compression)
6. “Virtual Analog Modeling of Dynamic Range Compression Systems (2017)” – Felix Eichas, Etienne Gerat, Udo Zölzer
7. “Comparison of the Teletronix LA-2A and 1176LN, Hardware and Software” (2012) – Klas Blomgren
8. “An Investigation Into The Sonic Signature Of Three Classic Dynamic Range Compressors” (2016) – Austin Moore, Dr. Rupert Till, Dr. Jonathan P Wakefield
9. “Comparing Analog and Digital Non-Linear Sonic Signatures” (2021) – Behzad Mehrnoosh

