Elektronische Klangerzeugung

Schaltungstechnik von A bis Z — analog, hybrid, digital

Syntagma Forschung Wien

Table of Contents

Elektronische Klangerzeugung

Schaltungstechnik von A bis Z — analog, hybrid, digital

Ein transdisziplinäres Hauptwerk · Ingenieurniveau mit Laien-Einstieg Syntagma Forschung Wien · CC BY 4.0 · PROVISORISCH FORSCH ≥0374 (Slug `elektronische-klangerzeugung`)

Auslöser: Ray Wilson, *Make: Analog Synthesizers*. Dieses Werk löst die Prinzipien vom einzelnen Lehrgerät ab und arbeitet sie systematisch, bilingual und mit interaktiven Werkzeugen (T1–T7) auf. **Hinweis:** Mit `[zu verifizieren]` markierte Stellen sind vor einer Veröffentlichung gegen aktuelle Primärquellen zu prüfen.

Teil 0 — Orientierung

Dieser Teil erklärt, was das Buch will, wie es zu lesen ist und was zu beachten ist, bevor der Lötkolben heiß wird. Wer sofort bauen will, liest 0.2 und 0.4 und springt dann zu Teil 4.1.

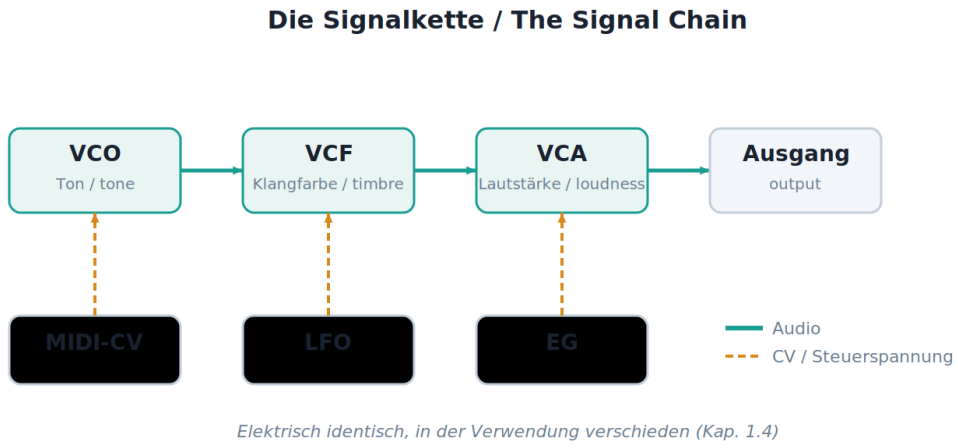


Abb. 1: Die Signalkette

Abb. 1: Die Signalkette

0.1 Was elektronische Klangerzeugung ist

Ein akustisches Instrument erzeugt Klang, indem etwas Physisches schwingt: eine Saite, eine Luftsäule, ein Fell. Der elektronische Klangerzeuger überspringt diesen Schritt. Er baut **direkt die Spannungskurve**, die ein Lautsprecher am Ende in Luftbewegung übersetzt.

Daraus folgt die Freiheit dieser Technik: Weil die Kurve nicht von einem physischen Körper vorgegeben wird, kann sie **beliebig** sein. Und daraus folgt zugleich das Problem: Weil sie beliebig sein kann, muss man wissen, welche Kurve man will und wie man sie herstellt. Genau das ist der Gegenstand dieses Buches.

Die Kernfrage lautet durchgehend: Wie erzeugt, formt und steuert man eine Spannung so, dass am Ende ein musikalisch brauchbarer Klang entsteht — und wie baut man die Schaltung, die das tut?

0.1.1 Was dieses Buch behandelt — und was nicht

Gegenstand ist die Hardware-Achse: Schaltungstechnik der Klangerzeugung, von den passiven Bauteilen über die Grundschaltungen und Module bis zum fertigen Instrument, den Systemformaten und der eigenen Entwicklung.

Nicht Gegenstand sind: - Mischung, Beschallung und Studiotechnik (eigener Werkstrang), - Lautsprecherbau und Raumakustik (eigener Werkstrang), - Softwaresynthese und DSP-Implementierung als Produkt (eigener Werkstrang; die Berührungspunkte stehen in Teil 7), - Musiktheorie und Komposition.

Die Abgrenzung ist bewusst: Jedes dieser Felder trägt ein eigenes Buch, und die Vermischung würde alle vier verwässern.

0.2 Wie dieses Buch zu lesen ist

0.2.1 Die Doppelspur

Jedes Kapitel hat zwei Eingänge, im Text durchgehend markiert:

- ▶️ **E — Einsteigerspur.** Was passiert, warum es passiert, mit Anschauung, Analogie und wo möglich einem minimalen Nachbau. Ohne höhere Mathematik lesbar.
- ▶️ **I — Ingenieurspur.** Die Rechnung: Formeln, Dimensionierung, Grenzen, Bauteilwahl.

Beide Spuren beschreiben denselben Gegenstand auf unterschiedlicher Auflösung. Wer nur bauen will, kommt mit ▶️ E und den Abgleichanleitungen weit. Wer entwickeln will, braucht beide.

0.2.2 Vier Lesewege

(A) „Ich will schnell etwas hören." 0.4 (Sicherheit) → 4.1.1 (555-Minimalnachbau) → 2.6 (Löten) → 4.5 (LFO) → 4.7 (Utilities)

(B) „Ich will einen Synthesizer bauen." 0.4 → 1 (Grundlagen) → 2 (Bauteile, Messtechnik) → 3 (OpAmp) → 4 (Module) → 5 (Instrument) → 6.1 (Format)

(C) „Ich will eigene Module entwickeln." Weg B → 8 (Simulation, KiCad, Fertigung) → 8.5 (Open Hardware) → 9 (Kochbuch)

(D) „Ich will verstehen, wie es funktioniert, ohne zu bauen." 1 (Grundlagen) → 3 (Grundschaltungen) → 4 (Module) → 7 (Hybrid/Digital), begleitend die Tools

0.2.3 Die Werkzeuge

Zu mehreren Kapiteln gehören interaktive Rechner, die dieselben Formeln verwenden wie der Text:

Tool	Thema	Kapitel
T1	Signalketten-Visualizer	4.8, 5.1
T2	Filter-Rechner (Bode-Plot)	4.2
T3	VCO-Stimm-/Exp-Konverter-Rechner	4.1, 3.3
T4	Hüllkurven-Simulator	4.4
T5	Eurorack-Strom-/HP-Kalkulator	6.1
T6	Chip-/Bauteil-Referenz	2.3, Anhang B

Sie laufen im Browser, ohne Installation und ohne Internetverbindung.

0.2.4 Konventionen im Text

- **[zu verifizieren]** markiert Angaben, die vor einer Veröffentlichung gegen aktuelle Primärquellen zu prüfen sind (Verfügbarkeiten, Preise, Projekt-Links). Das Buch nennt sie offen, statt sie zu verschweigen.
- **Querverweise** stehen als Kapitelnummer in Klammern, z. B. (4.1.2).
- **Formeln** stehen in der Ingenieurspur; jede wird im Text erklärt, bevor sie verwendet wird.
- **Bauteilwerte** sind Richtwerte für den Einstieg; die Begründung der Wahl steht jeweils dabei.

0.3 Die drei Epochen — eine Landkarte

Ein Überblick, damit die späteren Kapitel einzuordnen sind:

Epoche	Zeitraum	Prägend	Kapitel
Analog	ca. 1960–1980	spannungsgesteuerte Module, Moog/Buchla, 1V/Okt	1–6
Digital	ab ca. 1980	FM, Sampling, Wavetables, Presets	7
Hybrid / Renaissance	ab ca. 2000	analoger Signalweg + digitale Steuerung, Eurorack-DIY-Welle	6, 7, 8

Die Epochen lösen einander nicht ab, sondern lagern sich übereinander. Die analoge Technik ist nicht überholt — sie wird heute bewusst dort eingesetzt, wo ihre Eigenschaften (Sättigungsverhalten, kein Aliasing, unmittelbare Reaktion) gefragt sind. Der Aufbau dieses Buches folgt deshalb der Sachlogik, nicht der Chronologie: erst analog verstehen, dann digital ergänzen.

0.4 Sicherheit

Dieser Abschnitt ist der einzige im Buch, der nicht übersprungen werden sollte.

0.4.1 Netzspannung

Die Regel: Alles, was direkt an 230 V hängt, ist lebensgefährlich.

- **Fertige Netzteile verwenden.** Ein zertifiziertes Netzteil (Steckernetzteil oder gekapseltes Modul) trennt die Netzspannung sicher ab. Der Selbstbau des Primärkreises — Netztrafo, Netzsicherung, Netzschalter, Schutzleiter — verlangt Fachkenntnis und ist für den Einstieg der falsche Ort zum Lernen.
- **Nie an einem geöffneten Gerät arbeiten, das am Netz hängt.** Auch nicht „nur kurz".
- **Elkos speichern Ladung**, auch nach dem Ausschalten. Vor dem Anfassen entladen (definierter Entladewiderstand, nicht kurzschließen) und mit dem Multimeter kontrollieren.
- **Bei Unsicherheit:** Der Niederspannungsteil (±12 V) ist ungefährlich, der Netzteil ist es nicht. Diese Grenze ernst nehmen.

0.4.2 Löten

- **Belüften.** Lötdämpfe (vor allem Flussmittel) sind Atemwegsreizstoffe. Fenster öffnen, besser eine Absaugung oder ein Lüfter, der die Dämpfe wegzieht.
- **Schutzbrille.** Beim Abkneifen von Bauteilbeinen fliegen Drahtstücke; beim Entlöten kann flüssiges Lot spritzen.
- **Hände waschen** nach dem Umgang mit bleihaltigem Lot; nicht essen oder trinken am Arbeitsplatz.

- **Der Kolben ist heiß** und bleibt es minutenlang nach dem Ausschalten. Ablage benutzen, Kabel nicht über die Spitze führen.

0.4.3 ESD (elektrostatische Entladung)

CMOS-Bauteile (CD4000-Serie, Mikrocontroller, viele moderne ICs) können durch statische Aufladung zerstört werden — oft **unbemerkt**, mit einem Schaden, der sich erst später als sporadischer Fehler zeigt.

Praktikables Minimum: - Vor dem Anfassen von ICs ein geerdetes Metallteil berühren (Heizkörper, Gehäuse eines geerdeten Geräts). - ICs in ihrer leitfähigen Verpackung lassen, bis sie eingesetzt werden. - Keine Kunststoffunterlagen und keine Wollpullover am Arbeitsplatz. - Für regelmäßiges Arbeiten: ESD-Matte und Handgelenkband.

0.4.4 Gehör

Der am häufigsten unterschätzte Punkt in einem Buch über Klangerzeugung.

- **Fehlersuche erzeugt unvorhersehbare Pegel.** Eine schwingende Schaltung, ein falsch verkabelter VCA oder ein Kurzschluss kann schlagartig Vollpegel auf den Kopfhörer geben. **Lautstärke vor jedem Einschalten herunterdrehen.**
- **Kopfhörer beim Testen abnehmen** oder über Lautsprecher mit geringer Lautstärke arbeiten, wenn an der Schaltung geschraubt wird.
- **Gehörschäden sind irreversibel** und kumulativ. Lange Sessions bei mittlerer Lautstärke sind schädlicher als kurze Spitzen — Pausen einplanen.
- **Selbstoszillierende Filter und hohe Resonanz** erzeugen sehr hohe Pegel bei schmalbandigen Frequenzen; besonders vorsichtig sein.

0.4.5 Ethik der Arbeit

Dieses Werk wird unter freier Lizenz veröffentlicht und ist auf Nachbau und Weiterentwicklung angelegt. Es enthält **keine** Anwendungen für militärische, waffentechnische oder Überwachungszwecke, und die hier beschriebenen Verfahren sind auch nicht dafür gedacht. Wer sie so verwendet, handelt gegen die erklärte Absicht des Werks.

0.5 Voraussetzungen

Was man mitbringen sollte: - Grundrechenarten und die Bereitschaft, eine Formel zu lesen (die Ingenieurspur erklärt jede, die sie verwendet). - Geduld beim Fehlersuchen — der überwiegende Teil der Bauzeit ist Fehlersuche, und das ist normal (5.4.2).

Was man nicht mitbringen muss: - Ein Studium der Elektrotechnik. - Vorhandene Ausrüstung: Teil 2.5 nennt die Anschaffungsreihenfolge, der Einstieg ist mit Multimeter und Lötkolben möglich. - Ein Modularsystem: Der Minimal-Nachbau in 4.1.1 kostet wenige Euro, und Teil 7.6 zeigt, wie sich alle Konzepte kostenlos in Software durchspielen lassen.

0.6 Verknüpfung

- **Direkt weiter zum ersten Ton:** Teil 4.1.1 (555-Minimalnachbau).
- **Systematischer Einstieg:** Teil 1 (Grundlagen).
- **Werkzeuge und Bauteile:** Teil 2.
- **Sicherheit im Aufbau:** Teil 5.2.4 (stufenweise Inbetriebnahme), Teil 6.1.2 (Verpolungsschutz).

Teil 1 — Physikalisch-signaltheoretische Grundlagen

Doppelspur. ▶️ E baut die Anschauung auf: was Klang physikalisch ist und wie er zur Spannung wird. ▶️ I liefert die Größen, mit denen später gerechnet wird. Dieser Teil ist die Voraussetzung für alle Modulkapitel — wer 4.1 ff. liest und stolpert, findet die Begründung meist hier.

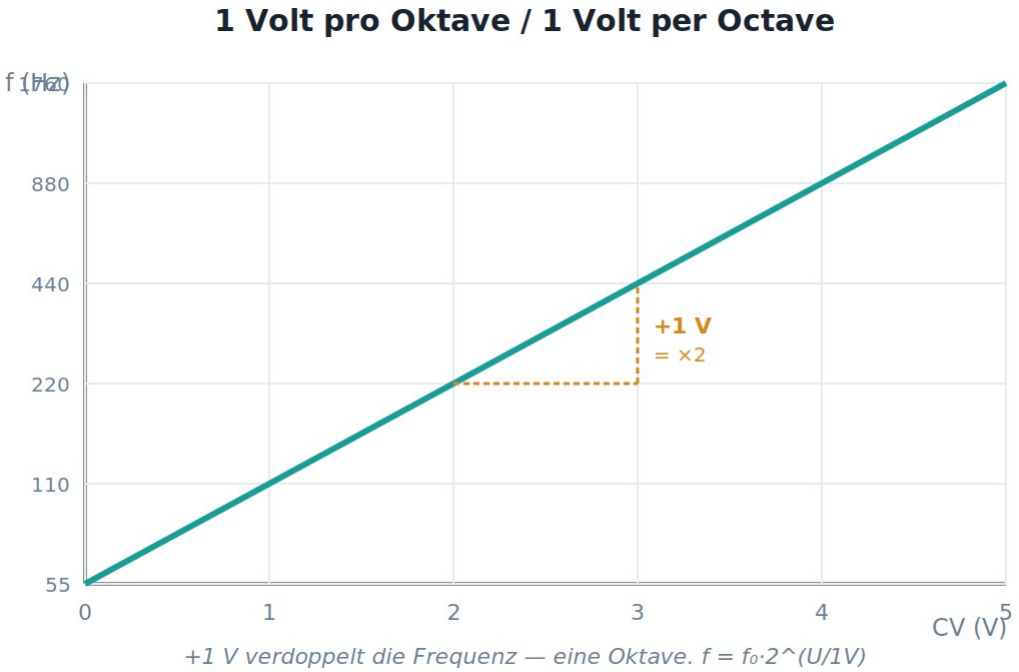


Abb. 2: 1V/Oktave-Kennlinie

Abb. 2: 1V/Oktave-Kennlinie

1.1 Schwingung, Frequenz, Obertöne

1.1.1 ▶️ E — Von der Luft zur Spannung

Schall ist eine **Druckschwankung in der Luft**. Ein Mikrofon wandelt sie in eine elektrische Spannungsschwankung um; ein Lautsprecher macht daraus wieder Druck. Dazwischen — in

Kabeln, Schaltungen, Modulen — ist Klang schlicht eine **Spannung, die sich über die Zeit ändert**.

Das ist der zentrale Perspektivwechsel dieses Buches: Der Synthesizer erzeugt Klang nicht durch schwingende Saiten oder Luftsäulen, sondern indem er **direkt die Spannungskurve baut**, die ein Lautsprecher später in Bewegung übersetzt. Alles Weitere ist die Frage, wie man diese Kurve formt.

1.1.2 ▶️ E — Die drei Grundgrößen

- **Frequenz** — wie oft sich die Schwingung pro Sekunde wiederholt, in Hertz (Hz). Bestimmt die **Tonhöhe**. Hörbereich beim Menschen etwa 20 Hz bis 20 kHz, mit dem Alter oben abnehmend.
- **Amplitude** — wie groß der Ausschlag ist. Bestimmt die **Lautstärke**.
- **Kurvenform** — wie eine einzelne Periode aussieht. Bestimmt die **Klangfarbe** (das Timbre).

1.1.3 ▶️ I — Fourier: warum die Form die Klangfarbe ist

Der Satz von Fourier besagt: **Jede periodische Schwingung lässt sich als Summe von Sinusschwingungen darstellen** — einer Grundfrequenz und ganzzahligen Vielfachen (den Obertönen oder Harmonischen).

Die Klangfarbe ist damit nichts anderes als die **Verteilung der Obertonamplituden**. Die kanonischen Wellenformen unterscheiden sich exakt darin:

Wellenform	Obertöne	Amplitudenabfall	Klang
Sinus	nur	—	rein, „pfeifend"
Dreieck	nur ungerade		weich, hohl
Rechteck	nur ungerade		hohl, klarinettenartig
Sägezahn	alle		hell, „schneidend", streicherartig

Warum das für den Synthesebau zählt: Der Sägezahn enthält *alle* Obertöne und ist deshalb das ideale Rohmaterial für **subtraktive Synthese** — man kann daraus mit einem Filter alles herausschneiden. Aus einem Sinus lässt sich durch Filtern dagegen nichts gewinnen, was nicht schon drin ist. Das erklärt, warum der Sägezahn die Standard-Wellenform klassischer Synthesizer ist (Teil 4.1, Teil 5.1).

Pulswelle und PWM: Ein Rechteck mit variablem Tastverhältnis (Pulsweite) hat ein Obertonspektrum, das sich mit der Pulsweite ändert — bei 50 % fehlen alle geraden Obertöne, bei anderen Werten kommen sie hinzu. Moduliert man die Pulsweite langsam (PWM), wandert das Spektrum: der charakteristisch „schwebende", breite Klang (Teil 4.5).

1.2 Pegel, dB und der Umgang mit Verhältnissen

1.2.1 ▶️ E — Warum Dezibel

Das Gehör arbeitet über einen enormen Bereich: vom gerade Hörbaren bis zur Schmerzgrenze liegt ein Faktor von etwa **einer Million** in der Amplitude. Solche Spannen sind linear unhandlich. Das **Dezibel** ist deshalb ein logarithmisches **Verhältnismaß** — es beschreibt immer ein Verhältnis, nie einen absoluten Wert (außer man nennt die Bezugsgröße mit, wie bei dBu oder dBV).

1.2.2 ▶️ I — Die zwei Formeln

Für **Spannungen** (und alle Feldgrößen):

Für **Leistungen**:

Der Faktor 20 vs. 10 ist die häufigste Verwechslung. Grund: Leistung geht quadratisch in die Spannung ein (), und .

Merkwerte (Spannung):

Verhältnis	dB
×1	0 dB
×2 (doppelt)	+6 dB
×10	+20 dB
×0,5 (halb)	−6 dB
×0,1	−20 dB
×0,707	−3 dB (Filter-Grenzfrequenz!)

Praktische Konsequenz: Die −3-dB-Marke bei der Filter-Grenzfrequenz (Teil 4.2) ist der Punkt, an dem die *Leistung* halbiert ist — die Spannung liegt dort bei .

1.2.3 ▶️ I — Pegel im Synth vs. Studio

Kontext	typischer Pegel	Bemerkung
Eurorack Audio	±5 V (10 Vpp)	Teil 6.1.4
Line (professionell)	+4 dBu ≈ 1,23 Veff	Studio
Line (Consumer)	−10 dBV ≈ 0,316 Veff	HiFi
Mikrofon	~1–50 mV	Vorverstärker nötig
Gitarre (passiv)	~100–500 mV	hochohmig!

Die Größenordnung: Ein Eurorack-Ausgang liefert grob **das Zehn- bis Zwanzigfache** eines Line-Pegels. Deshalb braucht es ein Ausgangsmodul (6.1.4) — direkt ins Mischpult gespeist übersteuert es dort massiv.

1.3 Impedanz: warum Ausgänge niederohmig und Eingänge hochohmig sind

1.3.1 ▶️ E — Das Prinzip

Impedanz ist der (frequenzabhängige) Widerstand, den ein Ein- oder Ausgang darstellt. Die Regel der Audiotechnik lautet **Spannungsanpassung**:

> Ausgänge **niederohmig** (klein), Eingänge **hochohmig** (groß).

Anschauung: Der Ausgang soll die Spannung „stur" liefern können, ohne dass die angehängte Last sie herunterzieht. Der Eingang soll möglichst wenig Strom ziehen, also die Quelle nicht belasten.

1.3.2 ▶️ I — Die Rechnung

Quelle mit Innenwiderstand an Last bildet einen Spannungsteiler:

Bei geht — kein nennenswerter Verlust. Beispiel Eurorack: Ausgangswiderstand, Eingangswiderstand:

Vernachlässigbar. Hängt man aber **zehn** Eingänge parallel (passives Multiple), sinkt die Lastimpedanz auf 10 kΩ:

Für Audio noch hinnehmbar. **Für Tonhöhen-CV nicht:** 9,1 % Spannungsverlust bedeutet bei 1 V/Oktave einen Tonhöhenfehler, der **mit der Steuerspannung wächst**:

CV (Soll)	ankommend	Fehler
1 V	0,909 V	1,1 Halbtöne (109 Cent)
3 V	2,727 V	3,3 Halbtöne (327 Cent)
5 V	4,545 V	5,5 Halbtöne (545 Cent)

Das Instrument ist also nicht nur verstimmt, sondern **über die Klaviatur zunehmend falsch** — es spielt zu kleine Intervalle. Das ist die exakte Begründung für gepufferte Multiples (Teil 6.1.4, 4.7.2).

1.4 Das CV-Prinzip: Spannung als Steuergröße

1.4.1 ▶️ E — Die zentrale Idee des Modularsystems

Der Durchbruch der Modulartechnik (Moog, Buchla, 1960er) war die Einsicht: **Wenn jeder Parameter durch eine Spannung gesteuert wird, kann jede Spannungsquelle jeden**

Parameter steuern. Eine Hüllkurve kann die Lautstärke steuern — oder die Tonhöhe, oder das Filter, oder die Pulsweite. Der Patch-Kabel-Salat ist die sichtbare Form dieser Universalität.

Es gibt zwei Sorten von Verbindungen, die man nie verwechseln darf:

- **Audio** — schwingt schnell (20 Hz–20 kHz), wird gehört.
- **CV (Control Voltage)** — ändert sich langsam (oder gar nicht), wird nicht gehört, sondern *steuert*.

Elektrisch sind beide gleich — dieselben Buchsen, dieselben Kabel. Der Unterschied liegt nur in Geschwindigkeit und Verwendung. Genau deshalb *kann* man einen LFO in den Audiobereich drehen und aus Modulation Synthese machen (4.5.1).

1.4.2 ▶️ I — Die Standards

Standard	Kennlinie	Verwendung
1 V/Oktave		Moog-Linie, Eurorack, De-facto-Standard
Hz/V		Korg/Yamaha (historisch), Buchla teilweise
Gate	Zustand hoch/tief	Note an/aus
Trigger	kurzer Impuls	Ereignis (Anschlag)

Warum 1 V/Oktave gewann: Die Kennlinie ist **additiv**. Will man zu einer gespielten Note eine Transposition um eine Quinte addieren, addiert man einfach 0,583 V (= 7/12 V). Bei Hz/V müsste man *multiplizieren* — schaltungstechnisch erheblich aufwendiger. Die Additivität macht Mixer, Offsets und Sequencer trivial (Teil 4.7.2). Die Umsetzung dieser Exponentialkennlinie ist das Thema von Teil 3.3.

1.5 Rauschen, Brummen, Masseführung

1.5.1 ▶️ E — Die vier Störungsquellen

1. **Eigenrauschen der Bauteile** — thermisch unvermeidbar, wird bei hoher Verstärkung hörbar (Teil 4.3.2).
2. **Netzbrumm** — 50 Hz (Europa) bzw. 60 Hz (USA) und Vielfache, aus Trafos und Netzleitungen eingestreut.
3. **Digitale Einstreuung** — Takt- und Schaltimpulse von Mikrocontrollern (Teil 7).
4. **Masseschleifen** — mehrere Masseverbindungen bilden eine Leiterschleife, die wie eine Antenne wirkt.

1.5.2 ▶️ I — Masseführung in der Praxis

Sternmasse (Star Ground). Alle Masseverbindungen laufen zu **einem** zentralen Punkt, statt sich in einer Kette zu verbinden. Grund: Bei einer Kette fließen die Ströme aller Stufen durch dieselben Leiterbahnabschnitte; deren Widerstand erzeugt Spannungsabfälle, die als Störsignal in empfindliche Stufen einkoppeln.

Praktische Regeln:

- **Analog- und Digitalmasse trennen** und nur an einem Punkt verbinden (typisch am Netzteil oder am DAC).
- **Abblockkondensatoren** (100 nF Keramik) direkt an jedem IC-Versorgungspin, so nah wie möglich. Sie liefern die schnellen Stromspitzen lokal, statt sie über die ganze Platine zu ziehen.
- **Zusätzlich Elko** (10–100 µF) pro Baugruppe als Energiereservoir.
- **Empfindliche Leitungen kurz halten:** CV-Bahnen und OTA-Eingänge sind hochohmig und fangen Störungen ein.
- **Masseschleifen zwischen Geräten** vermeiden: nur ein Erdungspfad; bei mehreren Cases mit eigenen Netzteilen ist Brummen typisch (Teil 6.1.5).

1.5.3 ▶️ I — Rauschabstand und Gain-Struktur

Der **Rauschabstand** (SNR) ist das Verhältnis von Nutzsignal zu Rauschen. Er wird von der **Gain-Struktur** bestimmt — also davon, wo im Signalweg verstärkt und wo abgeschwächt wird.

> **Grundregel:** So früh wie möglich auf den nötigen Pegel verstärken, danach nicht mehr unnötig abschwächen und wieder anheben.

Jede Abschwächung mit anschließender Verstärkung hebt das Rauschen der dazwischenliegenden Stufen mit an. Das ist der Grund, warum ein OTA-VCA mit starkem Eingangsteiler und nachfolgender Verstärkung mehr rauscht als ein Blackmer-VCA (Teil 4.3.2/4.3.3).

1.6 Verknüpfung

- **Wellenformen in der Praxis:** Teil 4.1 (VCO). **Filtern der Obertöne:** Teil 4.2 (VCF).
- **Pegel im Format:** Teil 6.1.4. **Gain-Struktur am VCA:** Teil 4.3.
- **Exponentialkennlinie schaltungstechnisch:** Teil 3.3.
- **Messtechnik zu diesen Größen:** Teil 2.5 (Oszilloskop, Multimeter, Frequenzzähler).
- **Tools:** T2 (Filter/Bode, dB-Achse), T3 (1V/Okt-Kennlinie).
- **Querverweis Korpus:** Pegel-/Beschallungspraxis in FORSCH-0288 (MISCHWERK).

Teil 2 — Bauteile, Messtechnik und Handwerk

> **Doppelspur.** ▶️ E: was man braucht, was es kostet, womit man anfängt. ▶️ I: Kenngrößen, Auswahlkriterien und die Fehler, die man an realen Bauteilen erlebt. Abschnitt 2.3 (Schlüssel-ICs) steht als eigenes Kapitel voran.

2.1 Passive Bauteile

2.1.1 ▶️ E — Widerstände

Der Widerstand begrenzt Strom und teilt Spannung. Für Synth-Bau gilt:

- **Metallschicht, 1 %, 1/4 W** ist der Standard. Kohleschicht (5 %) ist billiger, rauscht aber mehr und driftet stärker — bei CV-Pfaden und Filtern spürbar.
- **E24-Reihe** (1,0 · 1,1 · 1,2 · 1,3 · 1,5 …) deckt praktisch alles ab.
- **Sortiment kaufen**, nicht einzeln: ein E24-Sortiment 10 Ω–1 MΩ kostet wenig und erspart ständiges Nachbestellen.

▶️ I — Sonderfälle, die zählen:

Typ	Einsatz	Warum
Tempco +3300 ppm/K	Exp-Konverter (3.3.1)	kompensiert -Drift
Metallfilm 0,1 %	Präzisions-Teiler, Referenzen	Tracking-Genauigkeit
Hochohmig 10 M	Integrator-Entladung (3.1.2f)	verhindert Sättigungsdrift
Drahtwiderstand	Leistungsanwendungen	im Synth kaum nötig

Rauschen: Jeder Widerstand rauscht thermisch (Johnson-Nyquist). Das Rauschen wächst mit der Wurzel des Widerstandswerts — hochohmige Schaltungsteile im Signalweg rauschen also messbar mehr. Das ist mit ein Grund für die Impedanzkonvention aus Teil 1.3.

2.1.2 ▶️ I — Kondensatoren: der Typ entscheidet

Kondensatoren sind das Bauteil, bei dem die falsche Wahl am häufigsten Funktionsfehler erzeugt:

Typ	Bereich	Eigenschaften	Einsatz im Synth
Keramik NP0/C0G	pF–nF	sehr stabil, verlustarm	Zeitgebung, HF-Filter
Keramik X7R/Y5V	nF–µF	**spannungsabhängig!**, driftet	nur Abblockung
Folie (PET/PP)	nF–µF	stabil, geringer Leckstrom	**Zeitgebung, VCO, EG, S&H**
Elektrolyt (Elko)	µF–mF	gepolt, hoher Leckstrom, altert	Netzteil-Siebung
Tantal	µF	kompakt, gepolt	Digital-Versorgung

> **Die wichtigste Regel:** Für alles **Zeitbestimmende** — VCO-Integrator, Hüllkurve, S&H-Halteglied, LFO — gehören **Folienkondensatoren** hinein. Elkos haben Leckströme im nA-Bereich, die lange Hüllkurvenzeiten unmöglich machen (4.4.5) und S&H-Spannungen wegdriften lassen (3.4.2). X7R-Keramik ändert seine Kapazität unter Spannung um bis zu Dutzende Prozent — ein damit gebauter VCO stimmt nie.

2.1.3 ▶️ I — Potentiometer

- **Kennlinie: lin** (linear) für die meisten CV- und Mischanwendungen; **log** (logarithmisch, „A") für Lautstärke, weil das Gehör logarithmisch hört (1.2.1); **antilog** selten.
- **Bauform:** 9 mm für dichte Eurorack-Panels, 16 mm für bessere Haptik. Achslänge und Achstyp (Rändel/D-Flach) müssen zu den Knöpfen passen — häufige Fehlbestellung.
- ▶️ **I — Nicht in den Signalweg mit hohem Wert:** Ein 1-M-Poti im Audioweg rauscht und fängt Störungen; besser 10–100 k mit passendem Puffer.
- **Kratzen** entsteht durch Gleichspannung über der Schleiferbahn — Potis DC-frei betreiben oder Koppelkondensator vorsehen.

2.1.4 Dioden und Halbleiter-Kleinvieh

- **1N4148** — Universal-Kleinsignaldiode, Standard für Logik, Clipping, Schutz.
- **1N4001…4007** — Gleichrichter, Netzteil.
- **1N5817/1N5819 (Schottky)** — geringer Spannungsabfall, **Verpolungsschutz** in Eurorack-Modulen (6.1.2).
- **Zenerdiode** — Spannungsreferenz und Rauschquelle (4.6.2).
- **LED** — Anzeige; braucht **immer** einen Vorwiderstand: , typisch 1–5 mA für Panel-Anzeigen.

2.2 Aktive Bauteile: Transistoren

2.2.1 ▶️ E — Die drei Familien

- **Bipolar (BJT)** — stromgesteuert. NPN: **BC547/BC548**, 2N3904; PNP: BC557, 2N3906. Im Synth: Exp-Konverter (3.3), Ladder-Filter (4.2.3a), Rauschquelle (4.6.2), Schaltstufen.
- **JFET** — spannungsgesteuert, hochohmig. **J201, 2N5457**: als steuerbarer Widerstand (einfache VCAs/Filter), als Eingangsstufe.
- **MOSFET** — Leistungsschaltung, im Analogsynth selten; in Digitalmodulen als Schalter.

2.2.2 ▶️ I — Matched Pairs

Für den Exponentialkonverter (3.3.1) und das Ladder-Filter braucht man **gepaarte** Transistoren:

1. **Fertige Paare/Arrays:** THAT300/THAT320 (Quad), historisch CA3046/LM3046. Bereits auf einem Die → thermisch gekoppelt, sehr gut gepaart.
2. **Selbst paaren:** Mehrere Transistoren derselben Charge messen (bei gleichem Strom) und die zwei ähnlichsten nehmen; dann mit Wärmeleitpaste und Schrumpfschlauch mechanisch koppeln.
3. **Toleranz:** Schon 1 mV Unterschied in verschiebt die Skalierung merklich — deshalb ist die Paarung kein Perfektionismus, sondern Funktionsvoraussetzung.

2.4 Stromversorgung

2.4.1 ▶️ I — Die ±12-V-Welt

Analoge Synth-Schaltungen brauchen eine **symmetrische** Versorgung, damit Signale um 0 V herum schwingen können (bipolare CV, Audio). Standard im Eurorack: ±12 V, optional +5 V (6.1.2).

Erzeugungswege:

Weg	Prinzip	Anmerkung
Trafo + Gleichrichter + Linearregler	klassisch (7812/7912)	brummarm, ineffizient, warm
Schaltnetzteil (Meanwell o. ä.)	getaktet	effizient, kompakt; **HF-Störungen** möglich → gute Siebung nötig
Ladungspumpe/Inverter	aus +12 V die −12 V erzeugen	z. B. ICL7660/LT1054; nur für kleine Ströme
Bench-Netzteil	Labornetzteil	zum Entwickeln ideal (Strombegrenzung!)

▶️ **E — Für die Werkbank:** Ein **Labornetzteil mit einstellbarer Strombegrenzung** ist die wichtigste Anschaffung nach dem Lötkolben. Bei einem Kurzschluss im Prototyp begrenzt es den Strom, statt Bauteile zu verdampfen. Ideal: zwei getrennte Kanäle (für ±12 V) oder ein Doppelnetzteil.

2.4.2 ▶️ I — Siebung und Abblockung

Siehe auch 1.5.2. Praxisregeln für jedes selbstgebaute Modul:

- **100 nF Keramik** direkt an jedem IC-Versorgungspin (so kurz wie möglich).
- **10–47 µF Elko** pro Modul als lokales Reservoir.
- **Verpolungsschutz** (6.1.2) — nicht optional.
- **Ferritperle oder kleine Induktivität** in der Versorgung empfindlicher Analogstufen, wenn Digitalmodule im selben Case stören.

2.5 Messtechnik

2.5.1 ▶️ E — Die Reihenfolge der Anschaffung

1. **Digitalmultimeter (DMM)** — unverzichtbar, ab ~20 €. Misst Spannung, Strom, Widerstand, Durchgang.
2. **Labornetzteil mit Strombegrenzung** (2.4.1).
3. **Oszilloskop** — der Sprung von „irgendwas ist kaputt" zu „ich sehe, was passiert".
4. **Stimmgerät oder Frequenzzähler** — für VCO-Abgleich (4.1.4).
5. *Nice-to-have:* Funktionsgenerator, Kapazitätsmessgerät, zweites DMM, Logikprobe.

2.5.2 ▶️ I — Multimeter: worauf es ankommt

- **Durchgangsprüfer mit Ton** — die meistgenutzte Funktion beim Fehlersuchen (Kurzschlüsse, Lötbrücken).
- **Eingangsimpedanz** typisch 10 MΩ. Bei sehr hochohmigen Punkten (S&H-Halteglied, Integrator) belastet selbst das Messgerät die Schaltung und verfälscht — dort mit Puffer messen oder das Verhalten indirekt beurteilen.
- **True-RMS** nur nötig, wenn nicht-sinusförmige Wechselspannungen gemessen werden — im Synth eher selten, dort misst man mit dem Oszilloskop.
- **Diodentest** zum Prüfen von Transistoren und zum groben Paaren (2.2.2).

2.5.3 ▶️ I — Oszilloskop: die vier Kenngrößen

Kenngröße	Bedeutung	Für Synth-DIY
Bandbreite	max. Frequenz	20–50 MHz reicht weit; Audio braucht wenig, Digitalflanken mehr
Kanäle	gleichzeitige Signale	**2 Kanäle Minimum** (Eingang vs. Ausgang vergleichen), 4 komfortabel
Abtastrate	Samples/s	Faustregel ≥ 5–10× Bandbreite
Speichertiefe	Länge der Aufzeichnung	wichtig für langsame Hüllkurven bei feiner Auflösung

▶️ **E — DC-Kopplung nicht vergessen.** Steuerspannungen sind Gleichspannungen. Steht der Tastkopf-Eingang auf **AC**, verschwindet der DC-Anteil und Hüllkurven sehen falsch aus. Der häufigste Anfängerfehler beim Messen von CV.

Tastkopf 10:1 verwenden: geringere Belastung der Schaltung, höhere Bandbreite; dafür Anzeige ×10 beachten und den Tastkopf am Kalibrierausgang abgleichen (Trimmer im Stecker).

2.5.4 Was man womit misst

Frage	Instrument	Vorgehen
„Kommt Strom an?"	DMM	Rails an mehreren Punkten messen
„Stimmt der Ton?"	Frequenzzähler/Stimmgerät	VCO-Abgleich (4.1.4)
„Wie sieht die Welle aus?"	Oszilloskop	Kurvenform, Reset-Sauberkeit
„Wo bricht das Signal ab?"	Oszilloskop	Signalverfolgung Stufe für Stufe
„Ist die Lötstelle gut?"	DMM Durchgang	vor dem Einschalten prüfen
„Warum brummt es?"	Oszilloskop	50-Hz-Anteil sichtbar machen (1.5)

2.6 Handwerk: Löten, Prototyping

2.6.1 ▶️ E — Löten in fünf Sätzen

1. **Temperaturgeregelte Station**, 320–350 °C für bleihaltiges, 350–370 °C für bleifreies Lot.
2. **Beide Teile erhitzen** (Pad und Bauteilbein), dann Lot zuführen — nicht Lot auf die Spitze und hinschmieren.
3. **1–3 Sekunden** pro Lötstelle; länger schädigt Bauteil und Pad.
4. **Gute Lötstelle:** glänzend, konkav („Vulkan"), Pad vollständig benetzt. **Schlecht:** kugelig, matt, Bauteilbein sichtbar unbenetzt („kalte Lötstelle").
5. **Flussmittel ist der Freund** — es entfernt Oxide; Kolophonium-Kern im Lot genügt meist, zusätzliches Flussmittel hilft bei schwierigen Stellen.

Bleifrei vs. bleihaltig: Bleihaltiges Lot (Sn60Pb40/Sn63Pb37) ist deutlich einfacher zu verarbeiten und für Hobby/Reparatur in der EU erlaubt (RoHS betrifft das Inverkehrbringen von Geräten, nicht den Eigenbedarf) [zu verifizieren: aktuelle Rechtslage EU/AT für Hobbyanwendung]. Wer verkauft, muss bleifrei bauen.

2.6.2 ▶️ I — Entlöten

- **Entlötpumpe** — für einzelne Pads.
- **Entlötlitze** — für flache Reste und SMD.
- **Wichtigster Trick:** Frisches Lot auf die alte Stelle geben, bevor man absaugt. Das Flussmittel im neuen Lot macht die alte, oxidierte Stelle wieder fließfähig.
- **Durchkontaktierte Platinen** halten das Lot in der Bohrung; hier hilft nur gründliches Aufschmelzen mit ausreichend Wärme, sonst reißt das Pad.

2.6.3 ▶️ E — Vom Steckbrett zur Platine

1. **Steckbrett (Breadboard)** — schnell, ideal zum Lernen und für NF-Schaltungen. **Grenzen:** Kontaktwiderstände, Streukapazitäten, wackelige Verbindungen. Für Audio meist ausreichend, für Präzisions-CV grenzwertig.
2. **Lochraster/Streifenraster** — dauerhaft, aber Verdrahtungsaufwand; gut für Einzelstücke.
3. **Geätzte oder gefertigte Leiterplatte** — reproduzierbar, sauber, mit Massefläche. Ab dem zweiten Exemplar oder bei Präzisionsanspruch der richtige Weg (Teil 8.2).

Praxis: Analoge Präzisionsschaltungen (Exp-Konverter) verhalten sich auf dem Steckbrett oft merklich schlechter als auf einer Platine — Streukapazitäten und Kontaktrauschen. Wer dort scheitert, hat nicht zwingend einen Denkfehler gemacht (2.7 Fehlersuche).

2.7 Beschaffung und Vorratshaltung

▶️ E — Sinnvoller Grundvorrat:

Kategorie	Empfehlung
Widerstände	E24-Sortiment 10 Ω–1 MΩ, Metallschicht 1 %

Kategorie	Empfehlung
Kondensatoren	Folie 1 nF–1 µF, Keramik 100 nF (Abblockung), Elkos 10/47/100 µF
OpAmps	10× TL072, 5× TL074
Timer/Logik	5× TL555/NE555, 3× CD40106, 3× CD4066
OTA	3× LM13700
Transistoren	20× BC547, 20× BC557, 1× THAT300 o. Ä.
Dioden	50× 1N4148, 10× 1N5817
Buchsen/Potis	3,5-mm-Klinkenbuchsen, 9-mm-Potis lin 100 k

Bezugsquellen (Europa): Reichelt, Mouser, Digikey, TME, Farnell; für Synth-spezifisches Thonk (UK), Befaco (ES), Modular Addict (US) [zu verifizieren: aktuelle Verfügbarkeit, Versandbedingungen nach AT].

Surplus/Restposten: günstig, aber Vorsicht bei „NOS"-Klassikerchips (Fälschungsrisiko, 2.3.7).

2.8 Verknüpfung

- **Schlüssel-ICs im Detail:** Teil 2.3 (eigenes Kapitel).
- **Grundschaltungen mit diesen Bauteilen:** Teil 3.
- **Wo welcher Kondensatortyp:** VCO 4.1, EG 4.4, S&H 3.4.2/4.7.2f.
- **Verpolungsschutz und Rails:** Teil 6.1.2. **Masse/Brummen:** Teil 1.5.2.
- **Vom Prototyp zur eigenen Platine:** Teil 8.2. **Simulation vor dem Löten:** Teil 8.1.
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: Rechtslage bleihaltiges Lot (Hobby, EU/AT); aktuelle Distributoren, Preise und Lieferbedingungen. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 2.3 — Die Schlüssel-ICs der Klangerzeugung

Doppelspur. ▶️ E erklärt, *wofür* jeder Chip da ist und *wann* man ihn greift. ▶️ I gibt Innenleben, Grenzdaten und Dimensionierungsregeln. Dieses Kapitel ist Nachschlagewerk und Landkarte zugleich — die Chip-Steckbriefe in Anhang B vertiefen einzeln.

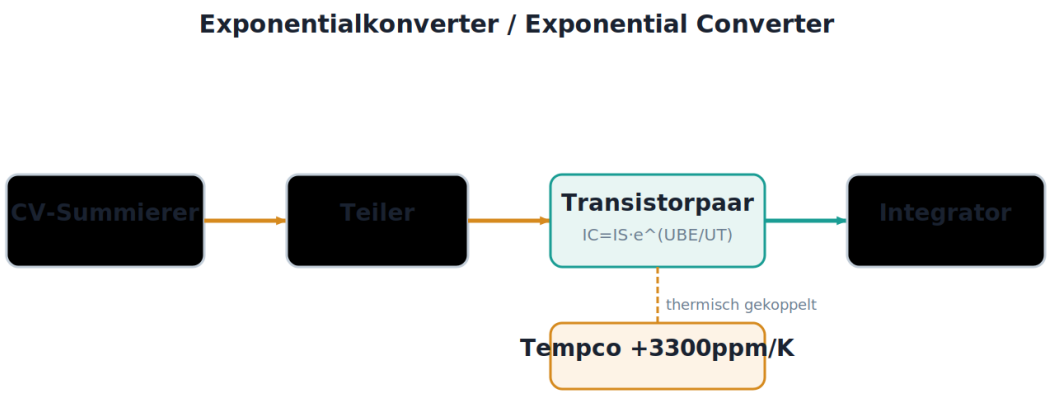


Abb. 5: Exponentialkonverter

Abb. 5: Exponentialkonverter

2.3.0 Warum ein Dutzend Chips fast alles abdeckt

Der analoge Synthesizer wirkt komplex, ruht aber auf einer kleinen Zahl wiederkehrender Bausteine. Fünf Funktionsklassen genügen für praktisch jedes klassische Modul:

Klasse	Aufgabe	Leitchip
Timer/Taktgeber	Rechteck, Takt, einfacher LFO/VCO	NE555
CMOS-Logik	Zählen, Teilen, Schalten, digitale Wellenform	CD4000-Serie
OpAmp	Verstärken, Rechnen, Puffern, Filtern	TL07x, TL08x
OTA	Spannungssteuerung von Verstärkung/Filter	LM13700
Dediziert	ganzer VCO/VCF/VCA/EG im Chip	CEM/SSI-Familie

Dazu kommen zwei Spezialisten: **BBD** (Eimerketten für analoge Delays/Chorus) und der **4046 PLL** (Frequenzvervielfachung, Sync). Wer diese kennt, liest 90 % aller DIY-Schaltpläne flüssig.

2.3.1 NE555 — der Timer

▶️ **E.** Der 555 ist der Einstiegs-Chip schlechthin: acht Pins, seit 1972, für Cent-Beträge überall verfügbar. Er erzeugt Rechteckschwingungen (astabil) oder Einzelimpulse (monostabil). Im Synth taugt er für Takt, einfachen Clock-LFO, Rausch-Trigger und den ersten hörbaren Ton

(Teil 4.1). Für tonhöhengenaue Musik ist er zu ungenau — aber unschlagbar zum Lernen und für Utility-Aufgaben.

▶️ **I.** Astabile Frequenz:

Grenzen: Versorgungsabhängige Schwellen (1/3 und 2/3 Vcc), Temperaturdrift im Prozent-Bereich, Ausgangsstrom bis ~200 mA (die bipolare Version zieht Strompeaks auf der Rail — bei empfindlichen Synth-Schaltungen die **CMOS-Variante 7555/TLC555** nehmen, geringere Störung, höhere Frequenz, µA-Verbrauch). Duty von exakt 50 % nur mit Diode über R2 oder Sonderbeschaltung.

2.3.2 CD4000-CMOS-Serie — Logik als Klangquelle

▶️ **E.** Die CD4000-Familie sind digitale Logikchips, die im Synth zweckentfremdet zu Klangbausteinen werden. Sie laufen von 3–15 V (ideal für die ±12-V-Welt), brauchen fast keinen Strom und sind billig. Wichtigste Vertreter:

- **CD4040 / CD4024** — Binärteiler/-zähler. Aus einem Oszillator werden per Zweierteilung ganze Oktavreihen (Top-Octave-Prinzip früher Orgeln und Drums).
- **CD4046** — PLL (eigener Abschnitt 2.3.6).
- **CD4051 / CD4052** — analoge Multiplexer, als Sequencer-Schrittschalter und Wellenform-Wähler.
- **CD4066** — vier analoge Schalter (Bilateral Switch), der Standard-Reset-/Routing-Schalter im VCO und für S&H.
- **CD40106** — sechs Schmitt-Trigger-Inverter. **Der** DIY-Liebling: jeder Inverter wird mit einem R und einem C zu einem eigenständigen Oszillator (Lunetta-/Nicolas-Collins-Welt). Sechs Stück pro Chip = sechs Stimmen für ein paar Cent.

▶️ **I.** Schmitt-Oszillator (40106): $ f $ (Hysterese-abhängig, Näherung). Beachte: CMOS-Eingänge sind hochohmig und statikempfindlich (ESD-Schutz, Teil 0.4); unbenutzte Eingänge **immer** auf definiertes Potenzial legen, sonst Oszillation und Stromverbrauch. Der 4066-Schalter hat einen Bahnwiderstand von ~80–300 Ω (spannungsabhängig) — bei Audiopfaden mit niedriger Lastimpedanz als Fehlerquelle mitdenken.

2.3.3 TL07x / TL08x & Verwandte — der Arbeits-OpAmp

▶️ **E.** Der OpAmp ist der Universalrechner der Analogtechnik: verstärken, mischen, puffern, filtern, vergleichen. Der **TL072** (dual) / **TL074** (quad) ist der De-facto-Standard im Synth-DIY: JFET-Eingang (hochohmig, gut für CV), rauscharm genug, billig, gutmütig. Für den Einstieg reicht ein Vorrat TL072/TL074.

▶️ **I.** Auswahlkriterien, wenn der TL07x nicht genügt:

Kriterium	TL07x	Alternative
Offset/Präzision (Exp-Konverter, Referenz)	mäßig	OP07, TL051, MCP6xx
Rail-to-Rail (Single-Supply-Digitalmodule)	nein	MCP600x, TLV23xx
sehr rauscharm (Audiopfad Studio)	ok	NE5532, OPA2134, LM4562
Slew Rate (schnelle Wellenformen)	13 V/µs	OPA-Serie

Faustregel: TL07x als Default, gezielt tauschen nur wo eine Kenngröße real limitiert. Die Grundschaltungen dazu in Teil 3.

2.3.4 LM13700 — der OTA (Operational Transconductance Amplifier)

▶️ **E.** Der OTA ist der Chip, der *Spannungssteuerung* erst möglich macht. Ein normaler OpAmp hat feste Verstärkung (durch Widerstände gesetzt). Beim OTA steuert ein **Strom** (, Amplifier Bias Current) die Verstärkung — und diesen Strom kann man aus einer Steuerspannung erzeugen. Damit baut man **VCA** (spannungsgesteuerte Lautstärke) und **VCF** (spannungsgesteuertes Filter). Der **LM13700** (dual, mit Darlington-Puffern) ist der zugängliche Klassiker; Vorgänger LM13600, verwandt CA3080 (single).

▶️ **I.** Die Transkonduktanz ist stromgesteuert:

Kernpunkte der Dimensionierung: - **Linearer Eingangsbereich** nur ~±20–30 mV (Differenzpaar). Größere Signale müssen **heruntergeteilt** (Eingangsteiler ~1/100) und am Ausgang wieder verstärkt werden, sonst Klirr. Die eingebauten **Linearisierungsdioden** (Pin-Diodenanschlüsse) erweitern den Bereich. - typ. 0–2 mA; Steuerung über Serienwiderstand zur CV oder über einen Exp-Konverter (für 1V/Okt-Filtertracking). - Die Darlington-Puffer im 13700 dienen als Impedanzwandler am Stromausgang.

Einsatz: VCA (4.3), OTA-Filter/State-Variable (4.2), auch als steuerbarer LFO/VCO möglich. Nachbauten: **AS3280/V3280** (Alfa RPAR) als CA3080-Ersatz, LM13700 selbst noch in Produktion [zu verifizieren].

2.3.5 Dedizierte Synth-ICs — CEM / SSM / SSI / AS

▶️ **E.** In den späten 1970ern integrierten Firmen wie **Curtis (CEM)** und **SSM** ganze Module in einen Chip: einen kompletten VCO, VCF oder VCA mit interner Temperaturkompensation. Sie stecken in den Klassikern (Prophet-5, SH-101, Juno, Oberheim). Lange nur gebraucht und teuer — heute liefern **Alfa RPAR (AS-Serie)** und **Cool Audio (V-Serie)** pinkompatible Nachbauten neu.

Original	Funktion	Aktueller Nachbau
CEM3340	VCO	AS3340 / V3340
CEM3320	VCF	AS3320 / V3320
CEM3360 / SSM2164	dual VCA	AS3360 / V3360, THAT2180
CEM3310 / SSM2056	EG (Hüllkurve)	AS3310 / V3310
SSM2044	VCF (4-Pol LP)	V2044

▶️ **I.** Vorteil: wenig externe Bauteile, stabiles Tracking, kompaktes Layout. Nachteil: weniger Lerntiefe („Blackbox"), Verfügbarkeit/Preis von Nachbau-Chargen schwankt, Datenblatt-Feinheiten (Trimmpunkte, Referenzströme) müssen sitzen. Entscheidung Chip vs. diskret wie in 4.1.3: Nachbau/Stabilität → CEM/AS; Verstehen/Modding → diskret oder OTA-basiert.

2.3.6 Spezialisten: BBD & PLL 4046

▶️ **E — BBD (Bucket-Brigade Device).** Eimerketten-Speicher: das analoge Signal wird von Kondensator zu Kondensator „geschöpft" und dabei verzögert. Das ist die Seele analoger **Delays, Chorus, Flanger** vor der Digitaltechnik (MN3005/MN3007/MN3207, Reticon). Warmer, leicht dunkler Klang, weil jede Stufe etwas Rauschen und Höhenverlust addiert. Steuert man die Taktrate, ändert sich die Verzögerungszeit — Grundlage von Chorus/Flanger.

▶️ **I.** Verzögerung $ t_d = $ (N = Stufenzahl). Braucht Anti-Aliasing-Filter vor und Rekonstruktions-Tiefpass nach der Kette, plus Kompander (NE570/571) gegen das hohe Grundrauschen. Taktchip früher MN3101; Nachbauten der Panasonic-BBDs von **Cool Audio (V3205 etc.)** und Xvive [zu verifizieren].

▶️ **E — PLL 4046.** Phase-Locked Loop: hält einen internen VCO auf ein Vielfaches/Verhältnis eines Referenztakts. Im Synth für Frequenzvervielfachung, Sub-Oktaven, harte Sync-Effekte und Taktrückgewinnung.

▶️ **I.** Kernblöcke: Phasenkomparator (PC1 XOR / PC2 flankengetriggert), interner VCO (R/C-gesetzt), Schleifenfilter. Wahl PC1 vs. PC2 bestimmt Lock-Verhalten und Störunterdrückung; Schleifenfilter setzt Einschwingzeit vs. Jitter.

2.3.7 Beschaffung, Fälschungen, Vorrat

- **Nachbau-Chips** (AS/V-Serie): über Thonk, Befaco, Reichelt, Mouser/Digikey [zu verifizieren: aktuelle Distributoren/Preise].
- **Fälschungsrisiko** bei „NOS"-Originalchips (CEM/SSM) auf Marktplätzen — umgelabelte Chips sind verbreitet; für Neubauten Nachbau-Serie bevorzugen.
- **Vorrat sinnvoll:** TL072/TL074, NE555/TLC555, CD40106, CD4066, LM13700, 1× VCO- und 1× VCF-Nachbauchip zum Experimentieren.

2.3.8 Verknüpfung

- **Grundschaltungen** dieser Chips: Teil 3 (OpAmp/OTA im Detail).
- **Module:** VCO (4.1, CEM3340/diskret), VCF (4.2, OTA/CEM3320), VCA (4.3, OTA/CEM3360), EG (4.4).
- **Steckbriefe:** Anhang B. **Tool:** T6 Chip-/Bauteil-Referenz (durchsuchbar).
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: aktuelle Produktions-/Bezugslage LM13700, AS/V-Serie, BBD-Nachbauten; Distributoren/Preise. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 3 — Der Operationsverstärker und die Grundschaltungen

Doppelspur. ▶️ E: die zwei Regeln, mit denen man 90 % aller OpAmp-Schaltungen liest. ▶️ I: die Dimensionierung, die Grenzen der Idealisierung und die synthesespezifischen Schaltungen (Exponentialkonverter, OTA). Dieses Kapitel ist das Rechenfundament für Teil 4.

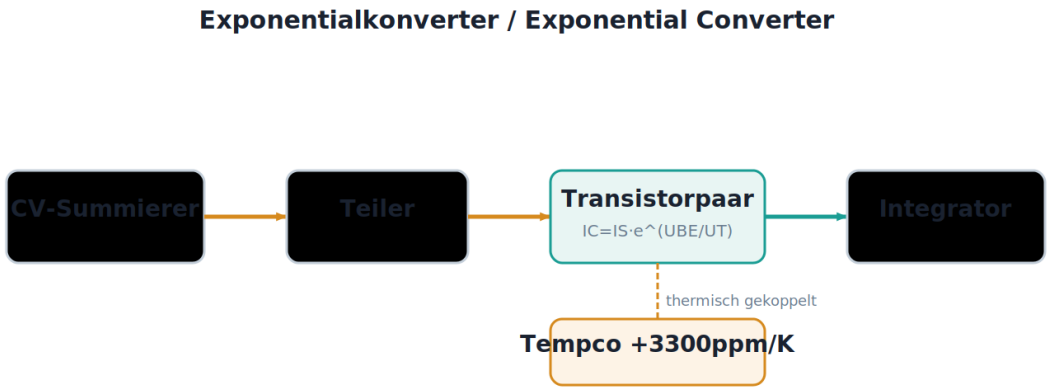


Abb. 5: Exponentialkonverter

Abb. 5: Exponentialkonverter

3.1 Der Operationsverstärker

3.1.1 ▶️ E — Die zwei goldenen Regeln

Ein OpAmp hat zwei Eingänge (+ und −) und einen Ausgang. Er verstärkt die **Differenz** zwischen den Eingängen — und zwar extrem stark (Leerlaufverstärkung typisch 100.000-fach). Praktisch nutzt man ihn nie ohne **Gegenkopplung**: ein Teil des Ausgangs wird auf den −Eingang zurückgeführt.

Mit Gegenkopplung gelten zwei Regeln, mit denen sich fast jede Schaltung ohne Rechnung verstehen lässt:

> **Regel 1:** Der OpAmp stellt seinen Ausgang so ein, dass **beide Eingänge dieselbe Spannung** haben. **Regel 2:** In die Eingänge fließt **kein Strom**.

Regel 1 ist der Kern: Der Verstärker „tut alles", damit die Differenz null wird. Regel 2 folgt aus dem sehr hohen Eingangswiderstand.

3.1.2 ▶️ I — Die Grundschaltungen

(a) Impedanzwandler (Spannungsfolger). Ausgang direkt auf −Eingang. Verstärkung = 1. Nutzen: hochohmig rein, niederohmig raus. Das ist der **gepufferte Multiple** aus Teil 4.7.2 und der Ausgangspuffer jeder Hüllkurve (4.4.3).

(b) Nichtinvertierender Verstärker.

Signal an +Eingang, Teiler von Ausgang über auf −Eingang, von dort nach Masse. Verstärkung immer ≥ 1, Phase bleibt erhalten.

(c) Invertierender Verstärker.

Signal über auf den −Eingang, vom Ausgang zurück, +Eingang an Masse. Der −Eingang liegt dadurch auf **virtueller Masse** (Regel 1: er muss auf 0 V liegen, weil + auf 0 V liegt). Verstärkung kann kleiner als 1 sein; das Signal wird invertiert.

(d) Summierer (Mixer). Mehrere Eingänge über je einen Widerstand auf die virtuelle Masse:

Weil alle Eingänge auf virtueller Masse landen, beeinflussen sie sich **nicht gegenseitig** — das ist der Grund, warum der invertierende Summierer der Standard-Mixer ist (Teil 4.7.2). Mit gleichen Widerständen wird daraus die einfache Summe. Für DC-gekoppelte CV-Mixer keinen Koppelkondensator einbauen (häufiger Fehler, 4.7.2d).

(e) Differenzverstärker. Verstärkt die Differenz zweier Signale und unterdrückt den gemeinsamen Anteil. Grundlage symmetrischer Ein-/Ausgänge (Teil 6.1.4, Ausgangsmodule).

(f) Integrator. Kondensator statt im Rückkopplungszweig:

Bei konstanter Eingangsspannung ergibt das eine **lineare Rampe**. Das ist der Kern des VCO (4.1.2) und des LFO (4.5.2). **Praxishinweis:** Ein reiner Integrator läuft durch kleinste Offsets langsam in die Sättigung; parallel zum Kondensator gehört ein sehr großer Widerstand (10 M) oder eine aktive Rücksetzung.

(g) Differenzierer. Kondensator im Eingangszweig — Ausgang proportional zur Änderungsrate. Im Synth selten als Rechenglied, oft als **Flankendetektor**: aus einem Gate wird ein Trigger.

3.1.3 ▶️ I — Wo die Idealisierung endet

Die goldenen Regeln gelten näherungsweise. Für Synth-Schaltungen sind vier reale Grenzen relevant:

Kenngröße	Bedeutung	Symptom bei Verletzung
Offsetspannung	Eingänge nicht exakt gleich	Integrator driftet, VCA schließt nicht ganz
Eingangs-Bias-Strom	doch ein kleiner Strom	Hüllkurven-Kondensator entlädt sich, lange Zeiten unerreichbar (4.4.5)
Slew Rate	max. Anstiegsgeschwindigkeit	steile Rechteckflanken werden „schräg", Höhen fehlen
Aussteuerbarkeit	Ausgang erreicht Rails nicht ganz	Clipping vor der erwarteten Spannung

Der TL07x hat FET-Eingänge und daher **sehr kleine Bias-Ströme** — genau deshalb ist er der Standard für Hüllkurven und CV-Pfade (Teil 2.3.3).

3.2 Komparator und Hysterese

3.2.1 ▶️ E — Vergleichen statt verstärken

Ohne Gegenkopplung wird der OpAmp zum **Komparator**: Er vergleicht die Eingänge und kippt den Ausgang auf eine der Versorgungsspannungen. Aus einer stetigen Spannung wird ein Schaltzustand — die Brücke zwischen Analog und Digital.

Anwendungen im Synth: Rechteckerzeugung aus dem Sägezahn (4.1.2), Gate aus CV (4.7.2g), Umschaltpunkt der Hüllkurve (4.4.3), Reset im VCO.

3.2.2 ▶️ I — Warum Hysterese unverzichtbar ist

Ein reiner Komparator kippt genau an der Schwelle. Liegt das Eingangssignal *nahe* der Schwelle und rauscht ein wenig, kippt der Ausgang **mehrfach hin und her** — das berüchtigte „Prellen" oder Schwingen an der Schaltschwelle.

Die Lösung ist der **Schmitt-Trigger**: eine Mitkopplung vom Ausgang auf den +Eingang. Dadurch entstehen **zwei** Schwellen — eine zum Einschalten, eine niedrigere zum Ausschalten. Die Differenz ist die **Hysterese**.

Faustregel: Die Hysterese muss deutlich größer sein als das Rauschen auf dem Eingangssignal. Zu klein → Prellen; zu groß → das Signal erreicht die zweite Schwelle womöglich nie und der Ausgang kippt gar nicht mehr.

Der **CD40106** (Teil 2.3.2) ist ein Schmitt-Trigger-Inverter mit fest eingebauter Hysterese — deshalb genügen dort ein R und ein C für einen kompletten Oszillator.

3.3 Der Exponentialkonverter (das Herz von 1V/Oktave)

3.3.1 ▶️ I — Die Schaltung

Teil 4.1.2 hat die Physik hergeleitet: Der Kollektorstrom eines Bipolartransistors folgt der Shockley-Gleichung

Der praktische Aufbau macht daraus eine brauchbare Steuerschaltung:

1. **Eingangsteiler.** Die CV (1 V/Okt) wird auf ~17,9 mV/Okt heruntergeteilt (Verstärkung ≈ 0,0179). Realisiert als Spannungsteiler mit **Trimmer** für den Scale-Abgleich.
2. **Summierung.** Vor dem Teiler werden alle Tonhöhenquellen addiert (Keyboard-CV, Sequencer, Transposition, LFO-Vibrato) — ein invertierender Summierer (3.1.2d). Hier zahlt sich die Additivität von 1V/Okt aus (1.4.2).
3. **Das Transistorpaar.** Zwei thermisch gekoppelte Transistoren als Differenzpaar. Der zweite Transistor liefert die Referenz und hebt den exemplarabhängigen -Term auf.
4. **Tempco.** Der Skalierungswiderstand hat +3300 ppm/K und ist thermisch an das Paar gekoppelt, um die -Drift zu kompensieren (4.1.2).
5. **Stromausgang.** Der Kollektorstrom lädt den Integrator-Kondensator (VCO, 4.1.2) oder setzt eines OTA (VCF/VCA).

3.3.2 ▶️ I — Der Log-Konverter (die Umkehrung)

Setzt man den Transistor in den Rückkopplungszweig eines OpAmp, entsteht die Umkehrfunktion: aus einem Strom wird eine logarithmische Spannung. Anwendung: Pegelmessung (VU/dB-Anzeige), Kompressoren und Hüllkurvenfolger.

3.3.3 Abgleich und typische Fehler

Der Abgleichablauf steht in 4.1.4. Die drei häufigsten Fehler:

- **Paar nicht thermisch gekoppelt** → Tracking driftet mit der Erwärmung.
- **Falscher Tempco-Wert** (z. B. normaler Metallschichtwiderstand statt +3300 ppm/K) → Drift bleibt.
- **Zu hochohmiger Summierpunkt** → Rauschen und Einstreuung auf der Tonhöhen-CV (1.5.2).

3.4 Präzisionsgleichrichter und Sample-&-Hold-Kern

3.4.1 ▶️ I — Präzisionsgleichrichter

Eine einfache Diode gleichrichtet erst ab ihrer Flussspannung (~0,6 V) — kleine Signale verschwinden. Nimmt man die Diode **in die Gegenkopplung** eines OpAmp, wird die Flussspannung durch die Verstärkung „wegregelt": Der Gleichrichter arbeitet ab wenigen Millivolt.

Anwendungen: Hüllkurvenfolger (aus Audio wird eine Steuerspannung), Dreieck-aus-Sägezahn (4.1.2), Betragsbildung im Wellenformer.

3.4.2 ▶️ I — Sample & Hold

Der Kern (siehe 4.7.2f) besteht aus drei Teilen:

1. **Analogschalter** (CD4066) verbindet Eingang und Haltekondensator während des Takts.
2. **Haltekondensator** speichert die Spannung. Folienkondensator, kein Elko (Leckstrom).
3. **Puffer mit sehr kleinem Bias-Strom** (FET-OpAmp) liest die Spannung aus, ohne den Kondensator zu entladen.

Die Droop-Rechnung. Der Spannungsabfall pro Zeit ergibt sich aus dem Gesamt-Leckstrom:

Beispiel: (guter FET-OpAmp plus Schalter-Restströme), :

Das ist für musikalische Zwecke vernachlässigbar. Bei 1 V/Oktave entspricht 1 mV/s einer Drift von **1,2 Cent pro Sekunde** — praktisch unhörbar.

Mit einem billigen Bipolar-OpAmp (Bias-Strom 100 nA statt 100 pA) wären es dagegen **1 V/s**, also **1200 Cent/s — eine volle Oktave pro Sekunde**. Die gehaltene Tonhöhe würde regelrecht davonlaufen. Genau deshalb ist die Bauteilwahl hier nicht optional, sondern funktionsentscheidend.

3.5 Der OTA im Detail

3.5.1 ▶️ I — Vom OpAmp zum OTA

Der reguläre OpAmp liefert eine **Spannung** am Ausgang und hat feste, durch Widerstände gesetzte Verstärkung. Der OTA (Teil 2.3.4) liefert einen **Strom** und hat eine **durch einen Strom steuerbare** Verstärkung:

Damit ist er der universelle Baustein für alles Spannungsgesteuerte: VCA (4.3.2), VCF (4.2.3b), steuerbarer LFO.

3.5.2 ▶️ I — Die Beschaltungsregeln

1. **Eingangsteiler zwingend.** Linearbereich ~±20–30 mV; Synth-Signale ±5 V. Teilerfaktor 100–200, danach Nachverstärkung (Gain-Struktur beachten, 1.5.3).
2. **Linearisierungsdioden** des LM13700 mit definiertem Strom versorgen — erweitert den Bereich deutlich.
3. **Stromausgang puffern.** Der OTA-Ausgang ist eine Stromquelle; ohne Lastwiderstand plus Puffer (die Darlington-Stufen im LM13700 oder ein externer OpAmp) ist die Spannung undefiniert.
4. **begrenzen.** Typisch 0–2 mA über einen Serienwiderstand; ohne Begrenzung wird der Chip zerstört.
5. **Offset trimmen**, wenn Control-Feedthrough (Klicken) stört (4.3.2).

3.6 Verknüpfung

- **Chips zu diesem Kapitel:** TL07x, LM13700, CD4066, CD40106 — Teil 2.3, Anhang B.
- **Anwendungen:** VCO (4.1), VCF (4.2), VCA (4.3), EG (4.4), Utilities (4.7).
- **Formeln kompakt:** Anhang A.
- **Physikalische Begründung von 1V/Okt:** Teil 1.4.2, Teil 4.1.2.
- **Rauschen/Gain-Struktur:** Teil 1.5.3.
- **Simulation dieser Schaltungen:** Teil 8.1 (LTspice/ngspice/Falstad).

Teil 4.1 — Der spannungsgesteuerte Oszillator (VCO)

Doppelspur. Dieses Kapitel hat zwei Eingänge. Die **Einsteigerspur** (▶️ E) erklärt, *was* passiert und *warum*, mit Bildern und einem minimalen Nachbau. Die **Ingenieurspur** (▶️ I) rechnet die Dimensionierung durch und benennt die Grenzen. Wer nur bauen will, folgt E und überspringt die I-Blöcke; wer entwickeln will, liest beides.

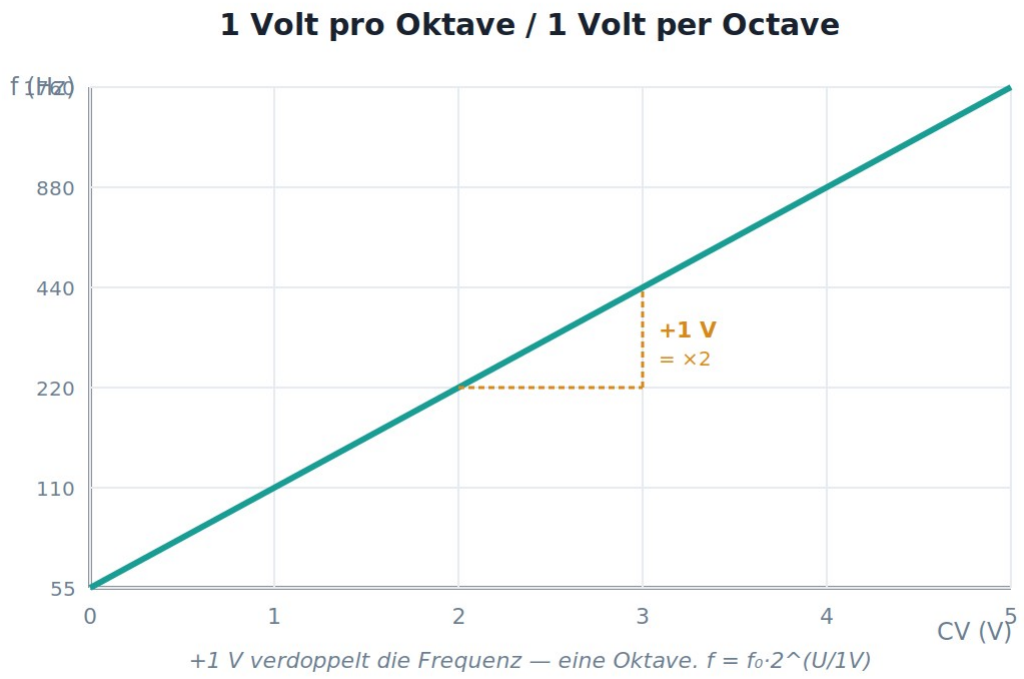


Abb. 2: 1V/Oktave-Kennlinie

Abb. 2: 1V/Oktave-Kennlinie

4.1.0 Einordnung in die Signalkette

Der VCO ist der **Tongenerator** des analogen Synthesizers. Er steht am Anfang der Signalkette:

```
[VCO] → [VCF] → [VCA] → Ausgang
   ↑        ↑       ↑
  CV       CV      CV / Hüllkurve
```

Er wandelt eine **Steuerspannung** (Control Voltage, CV) in eine **Frequenz** um. Die Konvention der westlichen Modularwelt lautet **1 Volt pro Oktave** (1V/Okt): Erhöht man die Steuerspannung um genau 1 V, verdoppelt sich die Frequenz — der Ton springt eine Oktave höher. Diese eine Konvention ist der Grund, warum Module verschiedener Hersteller zusammenspielen. (Buchla und einige japanische Systeme nutzen **Hz/V**, dazu Teil 6.2.)

4.1.1 ▶️ E — Was ein Oszillator tut

Ein Oszillator erzeugt eine periodische Schwingung: eine Spannung, die sich immer wieder gleich wiederholt. Wie oft sie sich pro Sekunde wiederholt, ist die **Frequenz** (in Hertz). 440 Wiederholungen pro Sekunde hören wir als Kammerton a′.

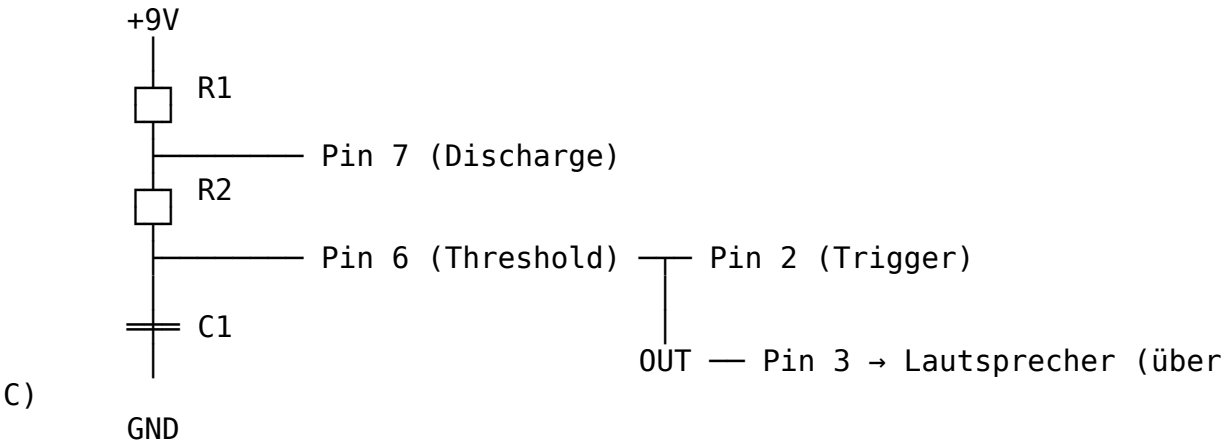
Die **Form** einer Periode bestimmt die Klangfarbe:

- **Sägezahn** — steigt langsam, fällt schlagartig. Enthält alle Obertöne. Heller, „schneidender" Klang, klassisch für Streicher- und Bass-Sounds.
- **Rechteck / Puls** — springt zwischen zwei Werten. Enthält nur ungerade Obertöne (reines Rechteck), klingt „hohl". Über die **Pulsweite** (PWM) formbar.
- **Dreieck** — steigt und fällt linear. Wenige, schnell abfallende Obertöne, weicher Klang.
- **Sinus** — nur die Grundschwingung, keine Obertöne. Reiner „Pfeifton".

Kern-Idee des analogen VCO: Man lädt einen Kondensator mit einem *konstanten Strom*. Die Spannung am Kondensator steigt dann **linear** an — das ergibt von selbst eine Sägezahn- bzw. Dreiecksflanke. Ist eine Schwelle erreicht, entlädt eine Schaltung den Kondensator schlagartig, und das Spiel beginnt von vorn. **Je größer der Ladestrom, desto schneller ist die Schwelle erreicht, desto höher die Frequenz.** Steuert man diesen Strom mit einer Spannung, hat man einen spannungsgesteuerten Oszillator.

Minimal-Nachbau (▶️ E): der Rechteck-VCO mit dem 555

Der einfachste hörbare Einstieg braucht einen einzigen Chip, den **NE555** (Timer-IC, seit 1972, Cent-Artikel):



Mit R1 = 1 kΩ, R2 = 10 kΩ, C1 = 100 nF erzeugt der 555 im *astabilen Modus* einen Rechteckton im hörbaren Bereich. Tauscht man R2 gegen ein Potentiometer, kann man die Tonhöhe von Hand fahren. Das ist **noch kein** echter VCO im 1V/Okt-Sinn (der 555 reagiert nicht exponentiell auf Spannung), aber es macht das Prinzip „Bauteilwert → Frequenz" in fünf Minuten hörbar. Wer den Ton hört, hat den Einstiegspunkt.

> **Warum der 555 kein guter Musik-VCO ist:** Seine Frequenz hängt *linear* von Widerstand und Kapazität ab ($f \approx 1{,}44 / ((R1+2 \cdot R2) \cdot C)$), nicht *exponentiell* von einer Steuerspannung. Für Töne, die unserem Oktav-Hören folgen, brauchen wir die Exponentialkennlinie — siehe I-Spur.

4.1.2 ▶️ I — Warum exponentiell? Die 1V/Oktave-Bedingung

Unser Gehör ist logarithmisch: gleiche *musikalische* Intervalle entsprechen gleichen *Frequenzverhältnissen*, nicht gleichen Frequenzdifferenzen. Eine Oktave ist immer Faktor 2, unabhängig von der Ausgangsfrequenz (110→220 Hz ist eine Oktave, ebenso 4400→8800 Hz).

Damit eine *lineare* Steuerspannung (bequem zu erzeugen und zu addieren) eine *musikalisch lineare* Tonhöhe ergibt, muss die Kennlinie exponentiell sein:

Jede zusätzliche Volt verdoppelt f. Das ist die formale Definition von 1V/Oktave. Genau diese Exponentialfunktion muss die Schaltung physikalisch herstellen.

Der Exponential-Konverter

Der Glücksfall der Halbleiterphysik: Der Kollektorstrom eines Bipolartransistors hängt **exponentiell** von der Basis-Emitter-Spannung ab (Shockley-Gleichung):

mit der Temperaturspannung bei 300 K. Legt man also eine linear ansteigende Spannung an die Basis, steigt der Kollektorstrom exponentiell — und dieser Strom lädt den Timing-Kondensator. Damit ist die 1V/Okt-Kennlinie hergestellt.

Zwei Probleme, zwei kanonische Lösungen:

1. **Skalierung.** Aus mV folgt: für einen Faktor 2 (eine Oktave) braucht man an der Basis nur mV, nicht 1 V. Ein Eingangsteiler (Verstärkung ≈ 0{,}0179) bringt die 1 V/Okt auf diesen Wert. Der Teiler wird mit einem Trimmer als **Scale-/Tracking-Abgleich** ausgeführt (Ziel: exakt 1{,}000 V/Okt über mehrere Oktaven).
2. **Temperaturdrift.** ist proportional zur absoluten Temperatur . Erwärmt sich der Transistor, verschiebt sich die Skalierung — der VCO „läuft weg". Zwei Gegenmaßnahmen sind Standard:
   - **Matched Pair:** Zwei thermisch gekoppelte Transistoren (ein Differenzpaar, z. B. im Chip **THAT300/320**, früher **CA3046/LM3046**, oder als diskretes, mit Wärmeleitpaste verbundenes und mechanisch gepaartes Paar) heben den -Term gegeneinander auf.
   - **Tempco-Widerstand:** Der Skalierungswiderstand bekommt einen definierten positiven Temperaturkoeffizienten von **+3300 ppm/K** (Handelsname „Tempco", z. B. von KOA oder Vishay [zu verifizieren: aktuelle Bezugsquellen/Bezeichnung]), der die -Drift kompensiert. Er muss thermisch an das Transistorpaar gekoppelt sein.

Der Integrator und der Reset (Sägezahnkern)

Der exponentiell erzeugte Strom lädt einen Kondensator über einen **OpAmp-Integrator**. Die Ausgangsspannung ist die Rampe:

Ein **Komparator** überwacht die Rampe. Erreicht sie eine feste Schwelle, entlädt ein Schalter (früher FET, oft **CD4066** oder ein diskreter Reset) den Kondensator schlagartig — die Rampe springt zurück. Die Periodendauer ist:

Da exponentiell von der CV abhängt, ist es auch. **Der Kern-Trick des ganzen Kapitels steckt in dieser Zeile.**

Wellenformableitung

Aus dem Sägezahn werden die übrigen Formen abgeleitet, statt sie separat zu erzeugen:

- **Dreieck:** Statt hartem Reset wird zwischen Auf- und Ab-Integration umgeschaltet (bipolarer Integrator). Alternativ Sägezahn → Vollweggleichrichter.
- **Rechteck / Puls:** Ein Komparator vergleicht den Sägezahn mit einer Referenz. Ist die Referenz variabel, entsteht **PWM** (Pulsweitenmodulation).
- **Sinus:** Aus dem Dreieck über einen **Waveshaper** (Dioden-Netzwerk oder Differenzverstärker im weichen Begrenzungsbereich, das die Dreiecksspitzen „rundet"). Kein reiner Sinus, aber mit < 1 % Klirr erreichbar.

4.1.3 Fertige VCO-Chips vs. diskret

Historisch gab es dedizierte VCO-ICs, die den ganzen Kern integrierten:

Chip	Herkunft	Status	Bemerkung
CEM3340	Curtis, 1979	Nachbau verfügbar (AS3340 v. Alfa RPAR, Cool Audio)	Klassiker: Saw/Tri/Puls, Sync, Lin-/Exp-FM, interner Tempco
SSM2030 / SSM2033	SSM, 1980er	Original selten, Konzept in Nachbauten	frühe Prophet-/Synth-Klassiker
AS3340	Alfa RPAR (LV)	aktuell in Produktion [zu verifizieren]	pinkompatibler CEM3340-Nachbau, Cent- bis Euro-Bereich
XVCO / diskret	diverse DIY	offen	volle Kontrolle, mehr Abgleich

Entscheidungslogik: Für Nachbau und stabiles Tracking mit wenig Abgleich → **AS3340**. Für Lerntiefe und „von Grund auf verstehen" → diskreter Aufbau mit Matched Pair + Tempco. Beide Wege werden in Teil 5.2 an einem durchgerechneten Referenz-VCO gezeigt.

4.1.4 Praxis: Abgleich eines 1V/Okt-VCO

Ohne Abgleich stimmt kein analoger VCO. Der Ablauf (Reihenfolge ist wichtig, weil sich die Schritte gegenseitig beeinflussen):

1. **Scale/Tracking:** 0 V anlegen, Grundton notieren (z. B. per Stimmgerät). 1 oktavweise erhöhen (1 V, 2 V, 3 V …). Scale-Trimmer so justieren, dass jede Volt exakt eine Oktave ergibt. Über 3–5 Oktaven iterieren, weil oben und unten unterschiedlich driften.
2. **Tune/Offset:** Grundfrequenz per Tune-Regler auf gewünschten Referenzton legen.
3. **Hi-Freq-Trim (falls vorhanden):** Bei sehr hohen Frequenzen weicht die Kennlinie ab (endliche Reset-Zeit, Basisstrom). Ein zweiter Trimmer korrigiert das obere Ende.
4. **Temperatur:** Nach 10–15 min Warmlaufzeit nachkontrollieren. Bleibt Drift, ist die thermische Kopplung von Paar und Tempco zu prüfen.

Messtechnik: Frequenzzähler oder Stimmgerät für Tracking; Oszilloskop für Wellenform und Reset-Sauberkeit; für PWM ein zweiter Kanal auf der Modulationsquelle (Teil 2.5).

4.1.5 Grenzen und typische Fehler

- **Schlechtes Tracking über den Bereich:** meist Scale-Widerstand ohne Tempco oder Paar nicht thermisch gekoppelt.
- **„Weglaufen" im Betrieb:** Erwärmung; Tempco fehlt, ist falsch platziert oder falscher ppm-Wert.
- **Unsaubere Wellenform / fehlender Reset:** Reset-Schalter zu langsam oder Komparator schwingt; Hysterese prüfen (Teil 3.2).
- **Rausch-/Brumm-Einstreuung auf die CV:** hochohmige CV-Bahn; Masseführung und Abschirmung (Teil 1.5).
- **Aliasing (nur bei digitalen VCOs relevant):** analoge VCOs erzeugen keine Alias-Artefakte — ein Punkt, der im Hybrid-Teil (7.3) wichtig wird.

4.1.6 Verknüpfung

- **Voraussetzung:** Teil 3.3 (Exp-/Log-Konverter), Teil 3.2 (Komparator/Hysterese), Teil 1.4 (CV-Prinzip).
- **Folgemodule:** VCF (4.2) verarbeitet das VCO-Signal; VCA (4.3) formt die Lautstärke.
- **Tool: T3 VCO-Stimm-/Exp-Konverter-Rechner** (rechnet Skalierung, Tempco, erwartetes Tracking; interaktive Kennlinie).
- **Chips im Detail:** Anhang B (CEM3340/AS3340-Steckbrief).
- **Open-Source-Projekte mit dokumentiertem VCO:** MFOS „Ultimate VCO", YuSynth VCO, Mutable Instruments (digital, als Kontrast), Music Thing Modular [zu verifizieren: aktuelle Repos/Links].

[zu verifizieren] vor Veröffentlichung: aktuelle Verfügbarkeit/Bezeichnung AS3340 & Tempco-Widerstände; konkrete Repo-Links der genannten DIY-Projekte; THAT300/320-Aktualität. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 4.2 — Das spannungsgesteuerte Filter (VCF)

Doppelspur. ▶️ E: was ein Filter mit Klang macht und die vier Topologien im Überblick. ▶️ I: Übertragungsfunktion, Polordnung, Resonanz/Selbstoszillation, spannungsgesteuertes Cutoff-Tracking.

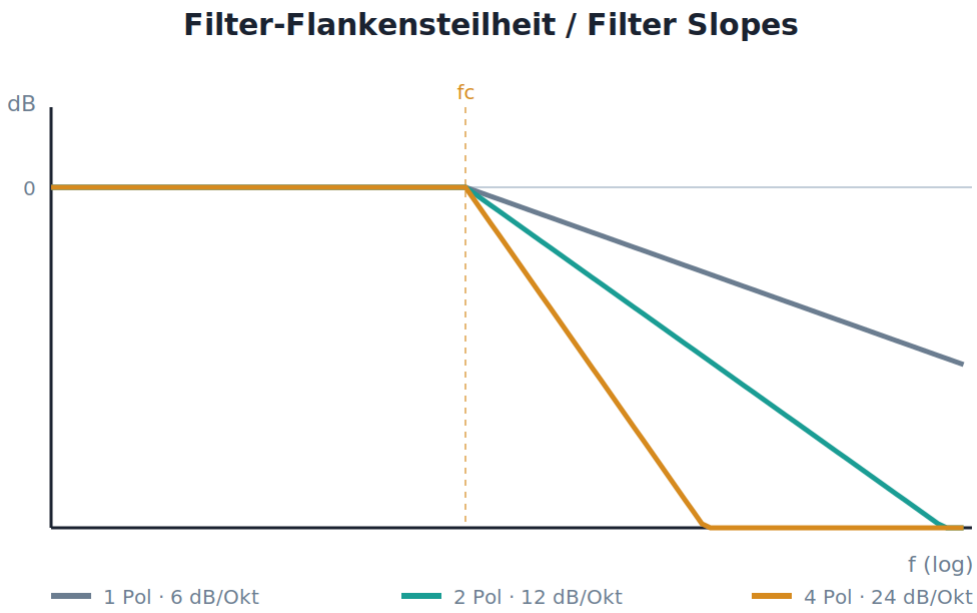


Abb. 4: Filter-Flankensteilheit

Abb. 4: Filter-Flankensteilheit

4.2.0 Einordnung

Das VCF sitzt hinter dem VCO und formt die Klangfarbe, indem es Obertöne wegnimmt oder betont:

```
[VCO] → [VCF] → [VCA]
          ↑
      Cutoff-CV (Hüllkurve, LFO, Keyboard)
```

Im subtraktiven Synthese-Paradigma ist das Filter das **entscheidende klangprägende Modul**. Der VCO liefert obertonreiches Rohmaterial (Sägezahn, Rechteck), das Filter meißelt daraus den Klang.

4.2.1 ▶️ E — Was ein Filter tut

Ein Filter lässt bestimmte Frequenzen durch und dämpft andere. Vier Grundtypen:

- **Tiefpass (LP)** — lässt tiefe Frequenzen durch, dämpft hohe. Der mit Abstand wichtigste im Synth: nimmt „Schärfe" weg, macht Klänge weicher/dunkler.
- **Hochpass (HP)** — umgekehrt: dämpft Tiefen, lässt Höhen durch. Nimmt „Wärme"/Bass weg.
- **Bandpass (BP)** — lässt nur ein Frequenzband durch. „Telefonstimme", nasal.
- **Notch / Bandsperre** — dämpft genau ein Band. Für Effekte, Phaser.

Zwei Regler prägen jeden Filterklang:

1. **Cutoff (Grenzfrequenz)** — wo das Filter zu wirken beginnt. Beim LP: darüber wird gedämpft.
2. **Resonanz (Q / Emphasis)** — überhöht den Bereich *um* die Cutoff-Frequenz. Wenig Resonanz = sanft; viel = pfeifend, scharf; ganz viel = das Filter beginnt **selbst zu schwingen** und wird zum Sinus-Oszillator.

Spannungssteuerung: Legt man das Cutoff auf eine CV (statt nur auf ein Poti), kann eine Hüllkurve den Klang über die Zeit öffnen/schließen (das „wah"/„zwitschernde" Filter-Sweep) oder ein LFO ihn periodisch modulieren.

4.2.2 ▶️ I — Polordnung und Flankensteilheit

Die **Flankensteilheit** gibt an, wie stark oberhalb (LP) der Cutoff-Frequenz gedämpft wird, gemessen in dB pro Oktave:

- **1 Pol = 6 dB/Okt** — sanft (einfaches RC-Glied).
- **2 Pol = 12 dB/Okt** — State-Variable, Sallen-Key.
- **4 Pol = 24 dB/Okt** — der „fette" Klang (Moog-Ladder, CEM3320). Der Standard für klassischen Analog-Sound.

Übertragungsfunktion eines Tiefpasses erster Ordnung:

Bei liegt die Verstärkung bei −3 dB. Für höhere Ordnung werden mehrere solcher Stufen kaskadiert; die Resonanz entsteht durch **Rückkopplung** vom Ausgang der letzten Stufe zurück auf den Eingang.

4.2.3 Die vier klassischen Filter-Topologien

(a) Transistor-Ladder — der Moog-Klang

▶️ **E.** Vier hintereinander geschaltete Tiefpass-Stufen (die „Leiter" aus Transistorpaaren) plus globale Rückkopplung. Der weiche, satte, leicht komprimierende Klang, der „Moog" definiert. 24 dB/Okt.

▶️ **I.** Cutoff wird über den Steuerstrom durch die Transistor-Differenzpaare gesetzt (temperaturabhängig → Tempco/Tracking wie beim VCO, 4.1.2). Resonanz per rückgekoppelter Schleife; bei hoher Resonanz Selbstoszillation. Charakteristisch: Bass-Verlust bei hoher Resonanz (die Rückkopplung entzieht Grundenergie) — Teil der „Moog"-Signatur. Diskret nachbaubar; als IC-Nachbau in diversen DIY-Modulen.

(b) State-Variable Filter (SVF)

▶️ **E.** Liefert LP, HP und BP **gleichzeitig** aus einer Schaltung (getrennte Ausgänge). Sehr flexibel, sauber, gut steuerbar. 12 dB/Okt pro Ausgang. Basis vieler „cleaner" Synth-Filter (Oberheim SEM).

▶️ **I.** Zwei Integratoren in einer Schleife plus Summierer. Cutoff über beide Integrator-Zeitkonstanten (mit OTAs spannungssteuerbar), Resonanz über den Dämpfungspfad (). Vorteil: Cutoff und Q weitgehend entkoppelt einstellbar. Der SEM-Klang: weniger „aggressiv" als Ladder, mehr „luftig".

(c) Sallen-Key

▶️ **E.** Einfache, robuste 2-Pol-Topologie mit einem OpAmp. Im MS-20 (Korg) als knurrig-aggressives Filter berühmt (dort mit besonderer Resonanz-Rückkopplung).

▶️ **I.** Ein OpAmp mit zwei R und zwei C; Cutoff über die RC-Glieder (spannungsgesteuert via OTA oder LDR/Vactrol im MS-20-Stil). Resonanz über positive Rückkopplung; das MS-20-Filter clippt bei hoher Resonanz charakteristisch (Verzerrung als Klangmerkmal).

(d) Diodenleiter (Diode Ladder)

▶️ **E.** Variante der Ladder mit Dioden statt Transistoren als Steuerelemente (EMS VCS3, TB-303, Roland-Klassiker). Kratziger, „flüssiger", eigenwilliger Klang — die Seele des Acid-Sounds (303).

▶️ **I.** Dioden als spannungsgesteuerte Widerstände in der Leiter. Aufwendiger im Abgleich, nichtlineares Verhalten bei Resonanz — gerade das macht den 303-Charakter (schreiende, „squelchy" Resonanz). Der 303-Filter ist deshalb Gegenstand zahlreicher DIY-Klone.

4.2.4 Vergleich der Topologien

Topologie	Steilheit	Klang	Ausgänge	Klassiker	Aufwand
Transistor-Ladder	24 dB/Okt	satt, komprimierend, Bass-Loss@Res	LP	Minimoog	mittel
State-Variable	12 dB/Okt	sauber, luftig, flexibel	LP/HP/BP	SEM	mittel
Sallen-Key	12 dB/Okt	knurrig, verzerrt@Re	LP/HP	MS-20	niedrig

Topologie	Steilheit	Klang	Ausgänge	Klassiker	Aufwand
Diodenleiter	18–24 dB/Okt	kratzig, squelchy	LP	303, VCS3	hoch

4.2.5 Cutoff-Tracking (Keyboard-Tracking)

▶️ **I.** Damit ein resonantes Filter über die Klaviatur „mitspielt" (bei Selbstoszillation als spielbare Tonquelle, oder um die Klangfarbe pro Note konstant zu halten), muss das Cutoff wie der VCO **exponentiell** auf die CV reagieren. Praktisch heißt das: dasselbe 1V/Okt-Problem wie in 4.1 — Exp-Konverter + Tempco am Filter-Steuereingang. Viele Filter bieten einen Tracking-Regler (0–100 %), der einstellt, wie stark die Tonhöhe das Cutoff mitzieht.

4.2.6 Selbstoszillation als Feature

Bei maximaler Resonanz kippt das Filter in Eigenschwingung und liefert einen (nahezu) reinen Sinus auf der Cutoff-Frequenz. Mit gutem Tracking wird das Filter damit zum **zweiten, spielbaren Oszillator** — eine übliche Technik, um einem Patch eine reine Sinus-Stimme hinzuzufügen (z. B. Kick-Drums aus dem selbstoszillierenden Filter).

4.2.7 Grenzen und typische Fehler

- **Kein/schlechtes Tracking:** Exp-Konverter/Tempco am Cutoff fehlt oder unkompensiert.
- **Filter oszilliert unkontrolliert:** Resonanz-Rückkopplung zu stark/falsch phasiert.
- **Pegelverlust bei hoher Resonanz:** topologiebedingt (Ladder) — ggf. Gain-Kompensation im Rückkopplungspfad.
- **Verzerrung ungewollt:** OTA-Eingang übersteuert (Eingangsteiler prüfen, 2.3.4).
- **Rauschen im BP/HP:** hohe Verstärkung im Sperrbereich; Bauteilrauschen wird hörbar.

4.2.8 Verknüpfung

- **Voraussetzung:** Teil 2.3.4 (OTA), Teil 3.1–3.2 (OpAmp-Grundschaltungen), Teil 4.1.2 (Exp-Konverter für Tracking).
- **Nachbar:** VCA (4.3) folgt in der Kette; EG (4.4) und LFO (4.5) modulieren das Cutoff.
- **Tool: T2 Filter-Rechner** (Cutoff/Resonanz/Topologie, Frequenzgang/Bode-Plot, Flankenvergleich).
- **Chips:** CEM3320/AS3320, SSM2044/V2044, LM13700 (OTA-Filter) — Anhang B.
- **Open-Source-Filter:** MFOS VCF, YuSynth (diverse), Mutable Ripples/Blades (Analog), diverse 303-Klone [zu verifizieren: Repos].

- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: aktuelle Chip-/Klon-Verfügbarkeit; DIY-Repo-Links. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 4.3 — Der spannungsgesteuerte Verstärker (VCA)

Doppelspur. ▶️ E: warum der unscheinbarste Baustein der wichtigste ist. ▶️ I: OTA- vs. Blackmer-Topologie, linear/exponentiell, Steuerspannungs-Durchgriff und Klirr.

4.3.0 Einordnung

Der VCA steht am Ende der Audiokette und bestimmt die **Lautstärke über die Zeit**:

```
[VCO] → [VCF] → [VCA] → Ausgang
                  ↑
              Hüllkurve (EG)
```

Ohne VCA klingt ein Synthesizer permanent — ein Dauerton. Erst der VCA schneidet aus dem endlosen Signal einzelne **Töne** heraus: Anschlag, Halten, Ausklingen. Er ist zugleich der Standard-Baustein für alles, wo eine Spannung eine Amplitude steuern soll — auch im **CV-Pfad** (Modulationstiefe regeln, „VCA für Modulation").

4.3.1 ▶️ E — Was ein VCA tut

Ein VCA ist ein Lautstärkeregler, an dem statt eines Fingers eine **Spannung** dreht. Steuerspannung 0 V → geschlossen (still); Steuerspannung hoch → offen (laut).

Zwei Einsatzorte, die man auseinanderhalten muss:

1. **Audio-VCA** — formt die Lautstärke eines hörbaren Signals. Muss sauber schließen (kein „Durchsickern") und darf nicht klicken.
2. **CV-VCA / Attenuator** — steuert die *Stärke einer Modulation*. Beispiel: ein LFO soll das Filter nur „ein bisschen" modulieren, und wie stark, soll wiederum eine Hüllkurve bestimmen.

Linear oder exponentiell? Zwei Kennlinien, zwei Zwecke:

- **Linear:** doppelte Steuerspannung = doppelte Amplitude. Richtig für **Modulationssteuerung** und für Hüllkurven, deren Form man exakt abbilden will.
- **Exponentiell:** gleiche Spannungsschritte = gleiche *Lautstärkeschritte* in dB. Entspricht dem Hören (wie 1V/Okt bei der Tonhöhe) und ergibt natürlicher wirkende Ausklingvorgänge. Viele VCAs bieten beide Modi per Schalter.

4.3.2 ▶️ I — Der OTA als VCA

Die naheliegendste Realisierung nutzt den OTA (Teil 2.3.4). Die Transkonduktanz ist stromgesteuert:

Der Steuerstrom wird aus der Steuerspannung erzeugt (Serienwiderstand für linear, Exp-Konverter für exponentiell). Damit ist die Verstärkung proportional zu — ein VCA.

Dimensionierungsregeln (die drei Fallen):

1. **Eingangspegel begrenzen.** Der lineare Eingangsbereich des OTA-Differenzpaars liegt bei ~±20–30 mV. Ein Synth-Signal von ±5 V muss also um Faktor ~100–200 heruntergeteilt und nach dem OTA wieder verstärkt werden. Ohne Teiler: hörbarer Klirr.
2. **Linearisierungsdioden nutzen.** Der LM13700 hat interne Dioden, die den linearen Bereich erweitern — mit definiertem Diodenstrom beschalten, sonst verschenkt man Headroom.
3. **Control-Feedthrough kompensieren.** Ändert sich sprunghaft (Hüllkurven-Attack), koppelt ein Teil der Steuerspannung als **Gleichspannungssprung** in den Audioweg — hörbar als **Klick**. Gegenmaßnahme: Offset-Trimmer am OTA-Eingang, symmetrischer Aufbau, und Hüllkurven ohne unendlich steile Flanken.

Rauschen und Klirr: Der OTA-VCA rauscht deutlich, wenn das Signal stark heruntergeteilt und danach wieder hochverstärkt wird — Rauschabstand ist der Preis der Einfachheit. Für Audiopfade mit Studioanspruch daher oft die nächste Topologie.

4.3.3 ▶️ I — Blackmer-/Current-Mode-VCA (die Studio-Klasse)

Die zweite Familie stammt aus der Studiotechnik (David E. Blackmer, dbx): ein **logarithmisch-antilogarithmisches Transistorpaar** im Strommodus, das eine exakt exponentielle dB-lineare Steuerung mit sehr niedrigem Klirr liefert.

- Chips: **THAT2180/2181** (aktuell), historisch **dbx2150**, **SSM2164** / Nachbau **V2164** (quad, sehr verbreitet in Eurorack).
- Kennlinie: typisch **−6 mV/dB** bzw. definierte dB pro Volt — exakt und temperaturkompensiert.
- Vorteil: großer Dynamikbereich, geringer Klirr, sauberes Schließen.
- Nachteil: teurer, weniger „Charakter" — was für Klangdesign auch ein Nachteil sein kann.

Faustregel: OTA (LM13700) für DIY-Lernen, Modulations-VCAs und charaktervolle Klangwege. V2164/THAT für polyfone Stimmen, Mixer-Automation und alles mit Rauschanspruch.

4.3.4 Weitere Realisierungen

Prinzip	Bauteil	Charakter	Anmerkung
OTA	LM13700, CA3080	typisch, etwas rau	DIY-Standard
Current-mode/ Blackmer	V2164, THAT2180	sehr sauber, dB-linear	Studio/Poly
Dediziert	CEM3360/AS3360, CEM3330	klassisch, kompakt	Synth-Klassiker
Vactrol (LDR+LED)	VTL5C3 o. ä.	weich, träge, „gummig"	langsame Reaktion als Klangmerkmal, Bauteil-Streuung [zu verifizieren: Verfügbarkeit]
FET	J-FET als Steuerwiderstand	einfach, begrenzt linear	historisch, hoher Klirr
Diskretes Diff-Paar	Transistoren	volle Lernkontrolle	Abgleichaufwand

Vactrol-Hinweis: Der träge, exponentiell-weiche Verlauf eines Optokopplers wird gezielt als Klangeigenschaft genutzt (Buchla-Ästhetik, „low-pass gate", siehe 4.3.6). Original-Vactrols sind schwer beschaffbar; DIY-Ersatz aus LED + LDR in Schrumpfschlauch ist üblich, streut aber stark.

4.3.5 Der Klick — Ursachen und Behebung

Klicken ist das häufigste VCA-Problem und hat drei verschiedene Ursachen, die man auseinanderhalten muss:

1. **Control-Feedthrough** (siehe 4.3.2): Steuerspannungssprung koppelt in den Audioweg → Offset-Trimmer.
2. **Zu steile Hüllkurvenflanken**: Attack/Release von exakt 0 ms erzeugt eine Sprungfunktion → im EG eine Mindest-Zeitkonstante (~1–2 ms) vorsehen.
3. **Gleichspannungs-Offset im Audiosignal**: Ein DC-behaftetes Signal springt beim Öffnen des VCA → Koppelkondensator am Eingang oder DC-Servo.

4.3.6 Verwandt: das Low-Pass Gate (LPG)

Eine westküsten-typische Variante (Buchla): VCA und Tiefpass werden **gemeinsam** von einem Vactrol gesteuert. Wird der Klang leiser, wird er zugleich dunkler — genau wie bei akustischen Instrumenten, deren Obertöne schneller abklingen als der Grundton. Ergebnis: das charakteristische „plonk"/„bongo"-Verhalten. Realisierung: Vactrol steuert Widerstand in einem RC-Tiefpass *und* die Dämpfung; Ansteuerung meist mit kurzem Trigger statt voller ADSR-Hüllkurve.

4.3.7 Grenzen und typische Fehler

- **VCA schließt nicht ganz** („bleeding"): Offset falsch getrimmt, oder Steuerspannung erreicht 0 V nicht.
- **Klirr bei lauten Signalen:** Eingangsteiler zu klein dimensioniert (OTA-Linearbereich überschritten).
- **Rauschen bei geschlossenem VCA:** Verstärkung nach dem OTA zu hoch angesetzt; Gain-Struktur überdenken.
- **Modulation „hängt":** bei Vactrol-VCAs normal (Trägheit) — Bauteileigenschaft, kein Fehler.
- **Exponentiell/linear verwechselt:** Hüllkurven wirken „falsch" — Modus prüfen (4.3.1).

4.3.8 Verknüpfung

- **Voraussetzung:** Teil 2.3.4 (OTA), Teil 3.1 (OpAmp-Grundschaltungen).
- **Steuerquelle:** EG (4.4), LFO (4.5). **Vorgänger** in der Kette: VCF (4.2).
- **Tool:** T4 Hüllkurven-Simulator zeigt, wie die EG-Form am VCA hörbar wird.
- **Chips:** LM13700, V2164/SSM2164, THAT2180, CEM3360/AS3360 — Anhang B.
- **Open-Source:** MFOS VCA, Befaco-VCA-Module, diverse LPG-Designs [zu verifizieren: Repos].
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: Verfügbarkeit V2164/THAT2180, Vactrol-Ersatztypen. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 4.4 — Der Hüllkurvengenerator (EG)

Doppelspur. ▶️ E: die Phasen einer Hüllkurve und was sie klanglich bedeuten. ▶️ I: RC-Zeitkonstanten, die Ladekurven-Mathematik, Gate/Trigger-Logik und die diskrete wie integrierte Realisierung.

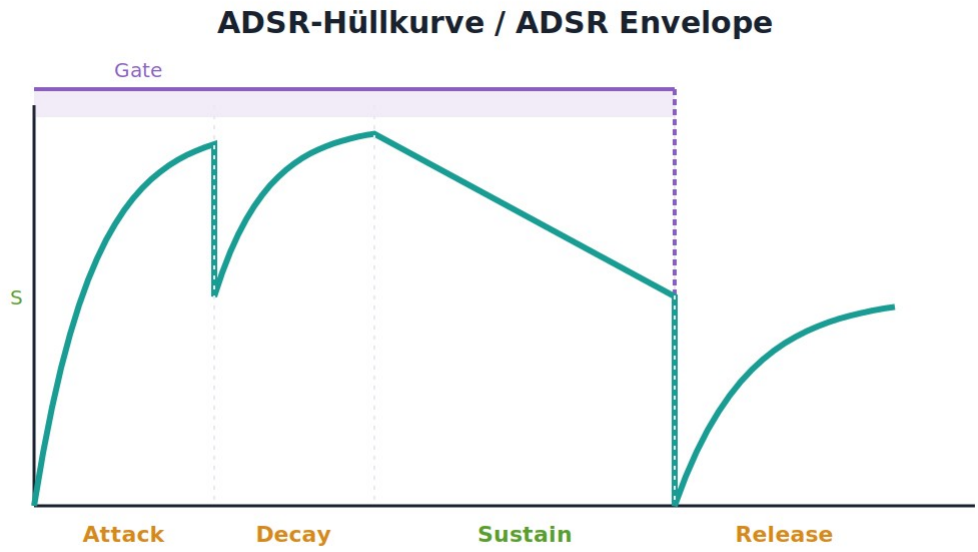


Abb. 3: ADSR-Hüllkurve

Abb. 3: ADSR-Hüllkurve

4.4.0 Einordnung

Der EG erzeugt kein Audiosignal, sondern eine **Steuerspannung, die sich über die Zeit ändert**. Er ist der Zeit-Gestalter des Instruments:

```
Gate/Trigger → [EG] ──┬──→ VCA (Lautstärkeverlauf)
                      └──→ VCF (Klangfarbenverlauf)
```

Ohne Hüllkurve klingt jeder Ton gleich lang und gleich laut. Die Hüllkurve macht aus einem Dauerton ein **Ereignis**: Anschlag, Ausklingen, Nachhall.

4.4.1 ▶️ E — Die Phasen

Der Standard ist **ADSR** — vier Parameter, die zusammen die Form beschreiben:

- **Attack (A)** — Zeit von 0 auf Maximum, nachdem die Taste gedrückt wurde. Kurz = perkussiv (Klavier, Drum); lang = anschwellend (Streicher, Pad).
- **Decay (D)** — Zeit vom Maximum herunter auf den Sustain-Pegel.
- **Sustain (S)** — **kein Zeitwert, sondern ein Pegel.** Die Höhe, auf der die Hüllkurve stehen bleibt, *solange die Taste gehalten wird*. Das ist der Punkt, den Einsteiger am häufigsten missverstehen.
- **Release (R)** — Zeit vom aktuellen Pegel zurück auf 0, nachdem die Taste losgelassen wurde.

Kürzere Varianten, die in der Praxis oft genügen:

Typ	Parameter	Einsatz
AR	Attack, Release	einfachste Form; Noise Toaster, viele DIY-Module
AD	Attack, Decay	perkussiv, feuert einmal durch (Drums, Blips)
ADSR	alle vier	Standard für spielbare Instrumente
DADSR	+ Delay	Verzögerter Einsatz (Layering, Streicher-Schwelle)

Gate vs. Trigger — der zweite häufige Stolperstein:

- **Gate** ist ein *Zustand*: die Spannung bleibt hoch, **solange** die Taste gedrückt ist. Der EG braucht das für Sustain.
- **Trigger** ist ein *Ereignis*: ein kurzer Impuls beim Anschlag. Ein AD-Envelope braucht nur den Impuls und läuft dann selbstständig durch.

4.4.2 ▶️ I — Die Mathematik der Flanken

Analoge Hüllkurven laden und entladen einen Kondensator über einen Widerstand. Die Flanken sind daher **exponentiell**, nicht linear:

Attack (Aufladung gegen die Zielspannung):

Decay/Release (Entladung):

Die **Zeitkonstante** ist die Kerngröße. Merkwerte:

Zeit	erreichter Anteil (Ladung)
1 τ	63,2 %
2 τ	86,5 %
3 τ	95,0 %
5 τ	99,3 % (praktisch „fertig")

Praktische Folgerung: Wird die „Attack-Zeit" als Zeit bis zum vollständigen Erreichen definiert, entspricht sie etwa **3–5 τ**. Ein Modul mit „Attack 1 ms bis 10 s" braucht also τ von rund 0,2 ms bis 2–3 s. Bei heißt das von ~200 Ω bis ~3 MΩ — genau deshalb sitzen in EG-Schaltungen große Potis (1 M) in Reihe mit einem kleinen Schutzwiderstand.

Warum exponentiell gut klingt: Das Gehör empfindet Lautstärke logarithmisch. Ein exponentiell abfallender Pegel wird als *gleichmäßiges* Ausklingen wahrgenommen — genau wie bei einer angeschlagenen Saite oder Glocke. Lineare Hüllkurven wirken dagegen „abgeschnitten". (Manche Module bieten umschaltbar lineare Flanken für spezielle Modulationsaufgaben.)

4.4.3 ▶️ I — Schaltungsrealisierung

(a) Der diskrete Klassiker (OpAmp + Schalter + RC)

Grundstruktur der klassischen analogen ADSR:

1. **Zustandslogik** wertet das Gate aus und entscheidet, in welcher Phase die Schaltung ist (Attack / Decay+Sustain / Release). Realisiert mit Komparatoren, einem Flipflop (CD4013) oder diskreten Transistoren.
2. **Ladepfad-Umschaltung:** Je nach Phase wird der Timing-Kondensator über den A-, D- oder R-Widerstand verbunden — typischerweise mit Analogschaltern (CD4066) oder Dioden-Steuerung.
3. **Pufferung:** Ein OpAmp-Impedanzwandler entkoppelt den Kondensator vom Ausgang, damit die Last die Zeiten nicht verändert. **Wichtig:** Der Puffer muss extrem hochohmig sein (FET-Eingang, TL07x), sonst entlädt der Eingangsstrom den Kondensator und lange Zeiten sind unerreichbar.

Der Attack-Umschaltpunkt: Ein Komparator erkennt, wann der Kondensator den Maximalwert (fast) erreicht hat, und schaltet auf Decay um. Weil die Ladung asymptotisch verläuft, wird meist bei ~95 % umgeschaltet — sonst würde die Attack-Phase nie enden.

(b) Dedizierte Chips

- **CEM3310 / AS3310, V3310** — kompletter ADSR im Chip, spannungssteuerbare Zeiten.
- **SSM2056** — ebenfalls klassisch, in Nachbauten verfügbar [zu verifizieren].
- Vorteil: wenige Bauteile, gleichmäßige Zeiten. Nachteil: weniger Eingriff, Verfügbarkeitsrisiko.

(c) Digital erzeugt

Mikrocontroller (Teil 7.2) berechnen die Kurve und geben sie über einen DAC aus. Vorteil: beliebige Kurvenformen, exakte Reproduzierbarkeit, Presets. Nachteil: Auflösung/Stufigkeit bei langsamen Rampen (Zipper-Noise), wenn DAC-Bittiefe oder Update-Rate zu gering sind.

4.4.4 Praxis: Hüllkurven für Klangtypen

Klangtyp	A	D	S	R	Bemerkung
Perkussiv (Drum, Pluck)	0–5 ms	100–400 ms	0	kurz	Sustain **0** ist entscheidend

Klangtyp	A	D	S	R	Bemerkung
Orgel/Gate	0–5 ms	—	max	0–10 ms	rechteckig, kein Ausklingen
Streicher/ Pad	0,3–1,5 s	mittel	hoch	0,5–2 s	langsames Anschwellen
Bass (gezupft)	0–2 ms	150–300 ms	niedrig	kurz	Filter-EG meist schneller als Amp-EG
Blas/Brass	30–120 ms	kurz	hoch	mittel	Filter-EG mit leichtem Überschwinger

Die wichtigste Praxisregel: VCA-Hüllkurve und VCF-Hüllkurve **getrennt** einstellen. Ein klassischer Brass-Sound entsteht dadurch, dass das Filter *schneller* öffnet und schließt als die Lautstärke — der „Anblas-Effekt".

4.4.5 Grenzen und typische Fehler

- **Klick am Attack:** Attack exakt 0 ms → Sprungfunktion. Mindest-τ (~1–2 ms) im Design vorsehen (siehe 4.3.5).
- **Lange Zeiten unerreichbar:** Puffer-OpAmp mit zu hohem Eingangsstrom, oder Leckstrom des Timing-Kondensators. Folienkondensator statt Elko verwenden.
- **„Sustain klingt wie Decay":** Sustain-Pegel als Zeit missverstanden — es ist ein Pegel (4.4.1).
- **Retrigger-Verhalten unklar:** Bei schnellem Spiel entscheidet die Logik, ob die Hüllkurve neu von 0 startet (Retrigger) oder vom aktuellen Wert weiterläuft (Legato). Beides ist gewollt — je nach Modul dokumentieren.
- **Zeiten ändern sich mit der Last:** Ausgangspuffer fehlt.

4.4.6 Verknüpfung

- **Voraussetzung:** Teil 2.1 (RC-Glied), Teil 3.2 (Komparator/Hysterese), Teil 2.3.2 (CD4066/CD4013).
- **Ziel-Module:** VCA (4.3), VCF (4.2). **Verwandt:** LFO (4.5) als zyklische Modulationsquelle.
- **Tool: T4 Hüllkurven-Simulator** (ADSR-Form, τ-Berechnung aus R·C, Vergleich exponentiell/linear).
- **Chips:** CEM3310/AS3310, SSM2056, CD4013/CD4066 — Anhang B.
- **Open-Source:** MFOS ADSR, YuSynth ADSR, Befaco Rampage (Function-Generator) [zu verifizieren: Repos].

- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: Verfügbarkeit AS3310/V3310, SSM2056-Nachbauten. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 4.5–4.7 — LFO, Rauschen und die Utilities

> **Doppelspur.** Diese drei Modulgruppen werden gemeinsam behandelt, weil sie zusammen die **Modulationsebene** eines Systems bilden. ▶️ E erklärt Zweck und Praxis, ▶️ I die Schaltungen.

Teil 4.5 — Der LFO (Low Frequency Oscillator)

4.5.1 ▶️ E — Was ein LFO tut

Ein LFO ist ein Oszillator, der **zu langsam schwingt, um gehört zu werden** — typisch 0,01 bis 30 Hz. Man hört ihn nicht als Ton, sondern als **Bewegung**: er moduliert andere Parameter.

Klassische Anwendungen:

Ziel	Wellenform	Ergebnis
VCO-Tonhöhe	Dreieck/Sinus, langsam	**Vibrato**
VCA-Lautstärke	Dreieck/Sinus	**Tremolo**
VCF-Cutoff	Dreieck	„wobbelndes" Filter, Dubstep-Wobble
Pulsweite (PWM)	Dreieck, sehr langsam	schwebender, breiter Klang
Panorama	Dreieck	Auto-Pan
Sample&Hold-Takt	Rechteck	Schritt-Zufall

Der fließende Übergang: Dreht man einen LFO in den hörbaren Bereich (über ~20 Hz), wird aus Modulation **Klangsynthese** — Vibrato wird zu FM (Frequenzmodulation), Tremolo wird zu Ringmodulation-artigen Seitenbändern. Viele Module bieten deshalb einen LFO/VCO-Umschaltbereich. Das ist keine Randnotiz, sondern das Grundprinzip der FM-Synthese.

4.5.2 ▶️ I — Schaltung

Ein LFO ist schaltungstechnisch ein VCO mit großen Zeitkonstanten. Zwei übliche Realisierungen:

(a) Integrator + Komparator (Dreieck/Rechteck-Kern). Ein OpAmp-Integrator lädt einen Kondensator linear; ein Schmitt-Trigger kippt bei Erreichen der Schwellen und dreht die Laderichtung um. Ergebnis: **Dreieck** am Integrator, **Rechteck** am Komparator, exakt phasenstarr. Frequenz:

(mit als Hysterese-Teiler des Schmitt-Triggers).

(b) Schmitt-Trigger-Inverter (CD40106). Ein Inverter, ein Widerstand, ein Kondensator — fertig ist ein LFO. . Sechs pro Chip. Liefert Rechteck plus (am Kondensator) eine exponentielle Sägezahn-Näherung.

Praxisdetails: - **Große Zeitkonstanten** brauchen Folienkondensatoren; Elkos haben Leckströme, die bei sehr langsamen LFOs (Minutenbereich) die Kurve verfälschen. - **Reset/Sync-Eingang**: erlaubt, den LFO auf einen Takt zu synchronisieren — wichtig für rhythmische Modulation. - **Bipolar oder unipolar?** Ein LFO für Tonhöhen-Vibrato sollte **bipolar** um 0 V schwingen (sonst verstimmt er die Grundtonhöhe). Ein LFO für Lautstärke wird oft **unipolar** gebraucht. Gute Module bieten beides oder einen Offset-Regler.

Teil 4.6 — Rauschgeneratoren

4.6.1 ▶️ E — Wozu Rauschen

Rauschen ist ein Signal ohne Tonhöhe — alle Frequenzen gleichzeitig, zufällig verteilt. Im Synthesizer unverzichtbar für:

- **Perkussion**: Snare, Hi-Hat, Becken sind gefiltertes Rauschen.
- **Wind, Meer, Atem**: Naturgeräusche.
- **Anblasgeräusch**: eine Prise Rauschen im Attack macht Bläser/Streicher realistischer.
- **Zufallsquelle**: über Sample & Hold wird Rauschen zu zufälligen Stufenspannungen (4.7).

Rauschfarben (die Analogie zum Lichtspektrum):

Farbe	Spektrum	Klang
Weiß	alle Frequenzen gleich stark	hell, zischend („Fernsehschnee")
Rosa (pink)	–3 dB/Oktave	ausgewogen, „natürlich" — gleiche Energie pro Oktave
Rot/Braun	–6 dB/Oktave	dumpf, rauschendes Meer
Blau/Violett	+3/+6 dB/Oktave	sehr hell, scharf

Warum rosa Rauschen „natürlicher" klingt: Unser Gehör arbeitet in Oktaven. Weißes Rauschen hat pro *Hertz* gleiche Energie — also in der Oktave 10–20 kHz zehnmal so viel wie in 1–2 kHz. Es klingt darum spitz. Rosa Rauschen hat pro *Oktave* gleiche Energie und wird als ausgewogen empfunden. Deshalb ist rosa Rauschen auch der Standard bei der Beschallungs-Einmessung (Querverweis: FORSCH-0288, MISCHWERK).

4.6.2 ▶️ I — Schaltung

(a) Zener-/Sperrschichtrauschen (analog). Eine in Sperrrichtung betriebene Basis-Emitter-Strecke eines Transistors (z. B. 2N3904) durchbricht bei ~6–9 V und rauscht dabei stark. Das Signal ist sehr klein (µV–mV) und braucht 2–3 Verstärkerstufen (Gesamtverstärkung 1000–10000).

- **Problem:** Die Rauschamplitude streut zwischen Exemplaren desselben Typs erheblich. In der Praxis werden mehrere Transistoren durchprobiert — ein bekanntes DIY-Ärgernis.
- **Alternative:** eigens spezifizierte Rauschdioden, oder ein Widerstand mit hohem Wert als Quelle thermischen Rauschens (sehr klein, viel Verstärkung nötig).

(b) Digital (LFSR). Ein rückgekoppeltes Schieberegister (Linear Feedback Shift Register) erzeugt eine pseudozufällige Bitfolge. Klassisch mit CD4006/CD4015 + XOR-Gatter, heute meist im Mikrocontroller. Vorteile: exakt reproduzierbar, keine Bauteilstreuung, definierbare Periodenlänge. Nachteil: streng genommen periodisch (bei ausreichender Registerlänge aber praktisch nicht hörbar).

(c) Rosa-Filter. Aus weißem Rauschen wird rosa durch ein Filter mit −3 dB/Oktave. Da echte −3 dB/Okt nicht mit einem einfachen RC-Glied erreichbar sind (das liefert −6), verwendet man ein **Kaskadenfilter** aus mehreren gestaffelten RC-Gliedern, das die −3-dB-Neigung über den Audiobereich annähert.

Teil 4.7 — Die Utilities (das unterschätzte Rückgrat)

4.7.1 ▶️ E — Warum Utilities entscheiden

Ein Modularsystem besteht nicht nur aus Klangerzeugern. Die **Verbindungs- und Formungsmodule** entscheiden darüber, ob ein System spielbar ist. Sie sind billig, unspektakulär und werden von Einsteigern konsequent zu spät gekauft (siehe 6.1.6).

4.7.2 Die wichtigsten Utilities

(a) Multiple (Verteiler) — verteilt ein Signal auf mehrere Ziele. - *Passiv*: Buchsen parallel verlötet. Für Gates/Audio in Ordnung. - *Gepuffert*: mit OpAmp-Impedanzwandler. **Pflicht für Tonhöhen-CV** (Begründung 6.1.4).

(b) Attenuator / Attenuverter — regelt die Stärke eines Signals herunter. - *Attenuator*: 0 … 100 % (nur Abschwächung, Potentiometer). - *Attenuverter*: −100 % … 0 … +100 % — kann das Signal auch **invertieren**. Ein LFO, der das Filter statt auf- zumacht. Unverzichtbar für Modulationsarbeit. - ▶️ I: Attenuverter = OpAmp mit Poti zwischen invertierendem und nichtinvertierendem Pfad; in Mittelstellung heben sich beide auf → Nullpunkt.

(c) Offset / Bias — addiert eine konstante Gleichspannung. Verschiebt einen bipolaren LFO in den unipolaren Bereich oder stimmt einen VCO manuell.

(d) Mixer (CV und Audio) — summiert Signale. ▶️ I: invertierender Summierer (Teil 3.2); bei CV auf **DC-Kopplung** achten — ein AC-gekoppelter Audiomixer kann keine Steuerspannungen mischen. Das ist ein häufiger Fehlkauf.

(e) Slew Limiter / Portamento — begrenzt die Änderungsgeschwindigkeit einer Spannung. Aus Tonhöhensprüngen wird **Glide/Portamento**; aus einem Gate wird eine Hüllkurvenform. ▶️ I: RC-Glied mit gepuffertem Ausgang; getrennte Rise-/Fall-Zeiten machen daraus einen vielseitigen Funktionsgenerator.

(f) Sample & Hold (S&H) — nimmt bei jedem Takt eine Momentaufnahme der Eingangsspannung und hält sie bis zum nächsten Takt. - ▶️ E: Rauschen + S&H = die klassische „Zufallsmelodie" (das „Computer"-Geräusch der 1970er). - ▶️ I: Analogschalter (CD4066) lädt einen Haltekondensator, gefolgt von einem **sehr hochohmigen** Puffer (FET-OpAmp). Der Kondensator entlädt sich sonst über den Puffereingang → die Spannung „sackt ab" (Droop). Kleiner Kondensator = schnelle Übernahme, aber mehr Droop; großer = stabil, aber träge.

(g) Komparator / Schwellwertschalter — macht aus einer Steuerspannung ein Gate, sobald ein Schwellwert überschritten wird. Aus einem LFO wird ein Rhythmusgenerator.

(h) Ringmodulator — multipliziert zwei Signale. Erzeugt Summen- und Differenzfrequenzen ohne die Originaltöne → metallische, glockige, „unmusikalische" Klänge. ▶️ I: klassisch mit Übertrager und Diodenring, modern mit einem Vierquadranten-Multiplizierer (**AD633**, oder das OTA-Prinzip). Bekannt als Dalek-Stimme (Doctor Who) und in Industrial/Noise-Ästhetik.

4.7.3 Die Faustregel

> Ein sinnvoll aufgebautes System hat **mindestens so viele Utility-HP wie Klangerzeuger-HP**. Wer drei VCOs und keinen Attenuverter hat, kann weniger als jemand mit einem VCO, zwei LFOs und vier Utilities.

Verknüpfung (4.5–4.7)

- **Voraussetzung:** Teil 3.1–3.2 (OpAmp: Summierer, Komparator, Hysterese), Teil 2.3.2 (CD4066, CD40106).
- **Ziele der Modulation:** VCO (4.1), VCF (4.2), VCA (4.3).
- **Tools:** T4 (Hüllkurven, verwandte Zeitkonstanten), T1 Signalketten-Visualizer (Patch-Logik).
- **Chips:** CD40106, CD4066, CD4015, AD633, TL07x — Anhang B.
- **Rosa Rauschen in der Beschallungsmesstechnik:** Querverweis FORSCH-0288 (MISCHWERK).
- **Open-Source:** MFOS LFO/Noise/S&H, Music Thing Modular Turing Machine (Zufall), Befaco Rampage (Slew/Function) [zu verifizieren: Repos].
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: AD633-Verfügbarkeit, Rauschtransistor-Empfehlungen aus aktueller DIY-Praxis. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 5 — Vom Modul zum Instrument

Doppelspur. ▶️ E: wie aus einzelnen Bausteinen ein spielbares Instrument wird. ▶️ I: Architekturentscheidungen, ein vollständig durchgerechneter Referenzbau, Mechanik und Abgleich. Dieser Teil führt die Modulkapitel (4.x) zusammen.

5.1 Architekturen der Klangsynthese

5.1.1 ▶️ E — Die Grundparadigmen

Ein Synthesizer ist nicht eine Technik, sondern eine **Entwurfshaltung**. Vier Paradigmen prägen die Praxis:

Paradigma	Prinzip	Typische Vertreter
Subtraktiv	obertonreiche Quelle → wegfiltern	Minimoog, SH-101, fast alles Klassische
Additiv	viele Sinus aufaddieren	Orgeln, Hammond, Kawai K5
FM/PM	Oszillatoren modulieren sich gegenseitig	DX7, Yamaha-Linie
Physical Modeling	akustischen Vorgang nachrechnen	digital (Teil 7)

Subtraktiv ist das Paradigma dieses Buches, weil es analog am direktesten realisierbar ist (Teil 1.1.3 begründet, warum der Sägezahn dafür das ideale Rohmaterial ist).

5.1.2 ▶️ E — West Coast vs. East Coast

Zwei Schulen, die sich historisch parallel entwickelten und bis heute die Ästhetik prägen:

East Coast (Moog, New York). Tastatur-orientiert, an klassische Instrumente angelehnt. Signalkette **VCO → VCF → VCA**, gesteuert von Hüllkurven. Ziel: spielbare, „musikalische" Klänge. Das ist die Kette, die Teil 4 durchgearbeitet hat.

West Coast (Buchla, Kalifornien). Nicht tastaturzentriert; Klang entsteht aus **Komplexität statt Subtraktion**. Charakteristische Bausteine: - **Complex Oscillator** — zwei Oszillatoren, die sich gegenseitig modulieren (FM, AM). - **Wavefolder/Waveshaper** — statt Obertöne wegzufiltern, werden zusätzliche *erzeugt*, indem die Wellenform „gefaltet" wird. - **Low-Pass Gate** (4.3.6) statt VCA+VCF getrennt. - **Zufall und Sequenzer** als kompositorische Werkzeuge statt Klaviatur.

▶️ **I — Der Wavefolder als Kontrast.** Beim Filter wird Obertonmaterial entfernt; beim Wavefolder wird eine Dreieck-/Sinuswelle an einstellbaren Schwellen „umgeklappt", wodurch neue, teils inharmonische Obertöne entstehen. Schaltungstechnisch: Diodennetzwerke oder OTA-Ketten in Sättigung. Klanglich: metallisch, glasig, dynamisch reagierend — hörbar anders als ein resonantes Filter. Das interaktive **Werkzeug T7 (Wavefolder-Visualizer)** zeigt die Faltung live und hörbar: mit wachsender Faltungstiefe entstehen sichtbar und hörbar immer mehr Obertöne.

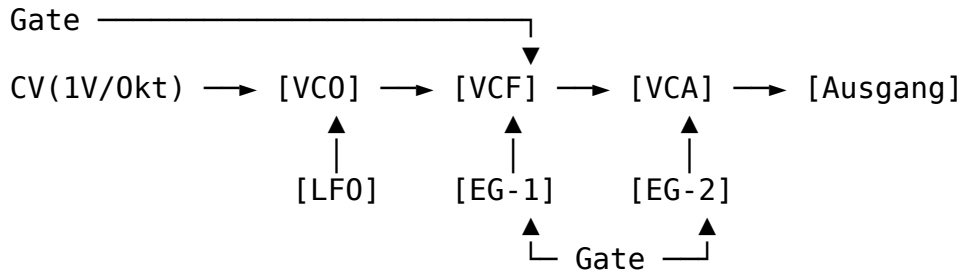
In der Praxis mischen die meisten heutigen Systeme beide Schulen — Eurorack ist formatoffen genug, dass ein Buchla-artiger Complex Oscillator neben einem Moog-Ladder-Filter steckt.

5.2 Der Referenz-Nachbau: ein vollständiger Minimal-Synth

5.2.1 ▶️ E — Was gebaut wird

Ein monophoner subtraktiver Synthesizer mit den Modulen aus Teil 4, als geschlossenes Gerät (kein Modularsystem). Ziel: **ein Instrument, das man am Ende spielen kann**, mit überschaubarem Bauteilaufwand.

Blockdiagramm:



5.2.2 ▶️ I — Modulwahl und Begründung

Block	Realisierung	Kapitel	Begründung
VCO	AS3340 (oder diskret + Tempco)	4.1.3	stabiles Tracking ohne aufwendigen Abgleich
VCF	LM13700-OTA, 12 dB SVF oder 24 dB Ladder	4.2.3	OTA ist beschaffbar und lehrreich
VCA	LM13700 (zweite Hälfte)	4.3.2	ein Chip für VCF+VCA spart Bauteile
EG ×2	diskret, CD4066 + TL072	4.4.3a	zwei getrennte Hüllkurven (Amp/Filter) sind der Kern des Klangdesigns
LFO	CD40106 oder TL072-Integrator	4.5.2	Dreieck + Rechteck
Interface	MIDI-to-CV (µC) oder Klaviatur-Widerstandsleiter	4.9 / 7.2	
Ausgang	Pegelabsenkung +	6.1.4	Synth-Pegel ist zu

Block	Realisierung	Kapitel	Begründung
	Kopfhörertreiber		heiß für Line

5.2.3 ▶️ I — Stromabschätzung

Grobrechnung für die Netzteildimensionierung (Methode wie in 6.1.3):

Block	+12 V	−12 V
VCO (AS3340 + Puffer)	~25 mA	~20 mA
VCF (LM13700 + OpAmps)	~20 mA	~20 mA
VCA (geteilter LM13700)	~10 mA	~10 mA
2× EG (TL072 + CD4066)	~12 mA	~10 mA
LFO	~8 mA	~8 mA
Ausgangsstufe	~15 mA	~15 mA
Summe	**~90 mA**	**~83 mA**

Mit 30 % Reserve: ein ±12-V-Netzteil ab ~150 mA je Rail genügt. Bei zusätzlichem Mikrocontroller-Interface separat +5 V rechnen (lokal aus +12 V regeln, 6.1.2).

5.2.4 ▶️ E — Aufbaureihenfolge (die Reihenfolge ist die halbe Miete)

Nicht alles auf einmal aufbauen. Stufenweise, jede Stufe testen:

1. **Stromversorgung** — Rails messen, bevor irgendein IC eingesetzt wird. (Häufigster Totalschaden: verpolte oder falsch dimensionierte Versorgung.)
2. **VCO allein** — Ton hörbar machen (Oszilloskop + Verstärker), dann Tracking abgleichen (4.1.4).
3. **VCF hinzufügen** — Filterwirkung mit statischem Cutoff prüfen, dann Resonanz.
4. **VCA hinzufügen** — mit fester Steuerspannung, dann Klick prüfen (4.3.5).
5. **EG-1 an VCA** — erst jetzt entstehen einzelne Töne.
6. **EG-2 an VCF** — die klangliche Ausdruckskraft entsteht hier.
7. **LFO** — zuletzt, als Modulationsschicht.
8. **Interface/Klaviatur** — spielbar machen.

▶️ **I — Warum diese Reihenfolge:** Jede Stufe hat einen **eindeutigen Testpunkt** und baut auf einer bereits verifizierten Stufe auf. Baut man alles und schaltet dann ein, hat man bei einem Fehler N mögliche Ursachen statt einer.

5.3 Gehäuse, Frontplatte, Verdrahtung — SCHICHTWERK-Integration

5.3.1 ▶️ E — Warum die Mechanik zählt

Ein elektrisch perfektes Modul mit schlechter Mechanik ist unbrauchbar: verkantete Potis brechen ab, wackelnde Buchsen erzeugen Aussetzer, eine unlesbare Beschriftung macht das Instrument unspielbar. Die Frontplatte ist zugleich das Bedieninterface — hier entscheidet sich, ob das Gerät benutzt wird.

5.3.2 ▶️ I — Fertigungswege für Frontplatten

Verfahren	Material	Vorteile	Grenzen
Laser (CO_2)	Acryl, Holz, Karton	schnell, präzise, gravierbare Beschriftung	kein Metall; Acryl bricht bei dünnen Stegen
Laser (Faser)/CNC	Aluminium	professionell, stabil, geschirmt	Aufwand/Kosten höher
3D-Druck FDM	PLA/PETG/ASA	Prototypen, Sonderformen, Distanzstücke	Oberfläche, Maßhaltigkeit, UV/Wärme
3D-Druck SLA	Resin	feine Details, glatte Oberfläche	spröder, UV-empfindlich
Fertigung extern	Alu eloxiert + Siebdruck	Serienqualität	Mindestmengen, Vorlaufzeit
PCB als Frontplatte	FR4	mit dem Board mitbestellt, Beschriftung im Lötstopp	Optik ist Geschmackssache; leitfähig bei Kupfer

Werkstatt-Kontext (SCHICHTWERK): Für den Eigenbau ist die Kombination **Laser für Acryl-/Holzpanels + FDM für Innenmechanik (Distanzhalter, Halterungen, Kabelführung) + SLA für Feindetails (Knopfkappen, Beschriftungsträger)** praxisnah. Bei Aluminiumpanels lohnt externe Fertigung ab kleinen Serien.

5.3.3 ▶️ I — Konstruktionsregeln für Eurorack-Panels

Aus 6.1.1 folgend, hier als Fertigungsvorgaben:

1. **Höhe 128,5 mm**, Breite = HP × 5,08 mm, minus ~0,3 mm Spiel je Seite, damit benachbarte Module nicht klemmen.
2. **Ovallöcher** für die M3-Befestigung — nie starre Rundlöcher (Toleranzausgleich, 6.1.1).
3. **Bohrungsdurchmesser** nach Bauteil: 3,5-mm-Buchsen typ. 6 mm, 9-mm-Potis 7 mm, Kippschalter 6 mm [je nach Fabrikat prüfen].
4. **Verdrehsicherung** bei Potis/Buchsen: entweder Zapfenloch vorsehen oder Zapfen abkneifen und auf Muttern-Anzug vertrauen.
5. **Materialstärke**: 2 mm Acryl ist grenzwertig (bricht bei Belastung an Buchsen), 3 mm ist praxistauglich; Alu 1,5–2 mm.

6. **Beschriftung** bei Acryl von der **Rückseite** gravieren und hinterfüllen — dann ist sie abriebfest.
7. **Bedienlogik** der Signalflussrichtung folgen: Eingänge unten/links, Ausgänge unten/rechts, Regler in Flussreihenfolge.

5.3.4 ▶️ I — Innenverdrahtung

- **Buchsen und Potis auf einer eigenen Platine** (Panel-PCB), verbunden mit der Hauptplatine über Stiftleisten — das erspart das Einzelverdrahten von Dutzenden Litzen und ist der Standard kommerzieller Module.
- Bei **freier Verdrahtung**: Litze (flexibel), nicht Massivdraht; Zugentlastung; Adern nach Funktion farbcodieren.
- **Massekonzept** (1.5.2) nicht durch die Verdrahtung ruinieren: Panel-Massen sternförmig auf einen Punkt führen, nicht von Buchse zu Buchse durchschleifen.
- **Abstand zwischen Netz-/Trafoteil und Analogsignal** maximieren; wo unvermeidbar, kreuzen statt parallel führen.

5.4 Abgleich, Test und Fehlersuche

5.4.1 Abgleichreihenfolge (Gesamtgerät)

1. **Rails** prüfen (Spannung, Brumm auf dem Oszilloskop).
2. **VCO-Tracking** (4.1.4) — Scale, Tune, ggf. Hi-Freq.
3. **VCF-Cutoff-Tracking** (4.2.5), falls vorhanden.
4. **VCA-Offset** — auf minimales Durchsickern und Klickfreiheit trimmen (4.3.5).
5. **EG-Zeiten** gegen die Spezifikation prüfen (4.4.2) und Klick am Attack ausschließen.
6. **Ausgangspegel** setzen (6.1.4).
7. **Nach 15 min Warmlaufzeit** VCO-Tracking nachkontrollieren (Temperaturdrift, 4.1.2).

5.4.2 ▶️ I — Systematische Fehlersuche

> **Grundprinzip:** Halbiere den Signalweg. Statt von vorn nach hinten zu prüfen, misst man in der Mitte — damit halbiert jeder Test den Suchraum.

Ablauf:

1. **Versorgung zuerst.** Rails an mehreren Punkten, auch direkt an den IC-Pins (nicht nur am Stecker).
2. **Signalverfolgung.** Ein bekanntes Testsignal einspeisen und mit dem Oszilloskop stufenweise verfolgen, bis es verschwindet oder verzerrt.
3. **Sichtprüfung.** Lötbrücken, kalte Lötstellen, verpolte Elkos/ICs, vergessene Bauteile. Ein Großteil aller Fehler ist mit einer Lupe sichtbar.
4. **Bauteile im Verdacht** einzeln prüfen (Diodentest, Widerstand messen — im ausgeschalteten, entladenen Zustand).
5. **Vergleich mit Simulation** (Teil 8.1): weicht das reale Verhalten von der Simulation ab, ist die Differenz der Hinweis.

Häufigste Ursachen in der Reihenfolge ihrer Wahrscheinlichkeit: Lötfehler → falsch bestückter Bauteilwert → verpolte/falsch orientierte Bauteile → Verdrahtungsfehler → tatsächlicher Schaltungsfehler → defektes Bauteil. Das defekte Bauteil ist deutlich seltener als vermutet.

5.5 Verknüpfung

- **Die Module im Detail:** Teil 4.1–4.7. **Bauteile und Messgeräte:** Teil 2.
- **Formatvorgaben:** Teil 6.1 (Eurorack-Maße, Strom, Pegel).
- **Eigene Platinen und Panels entwerfen:** Teil 8.2 (KiCad, Fertigung).
- **Digitale Erweiterung (MIDI-CV, Interface):** Teil 7.2.
- **Tools:** T5 (Strombudget), T1 (Signalketten-Visualizer), T2/T3/T4 (Dimensionierung), T7 (Wavefolder-Visualizer, Kap. 5.1.2).
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: konkrete Bohrungsmaße gängiger Buchsen-/Potifabrikate; aktuelle Fertigungsdienstleister und Konditionen. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 6.1 — Eurorack: Mechanik, Strom, Pegel

Doppelspur. ▶️ E: was Eurorack ist, was man zum Start braucht und welche Fallen teuer werden. ▶️ I: die Spezifikation im Detail — Maße, Busboard, Stromberechnung, Signalpegel, Impedanzen.

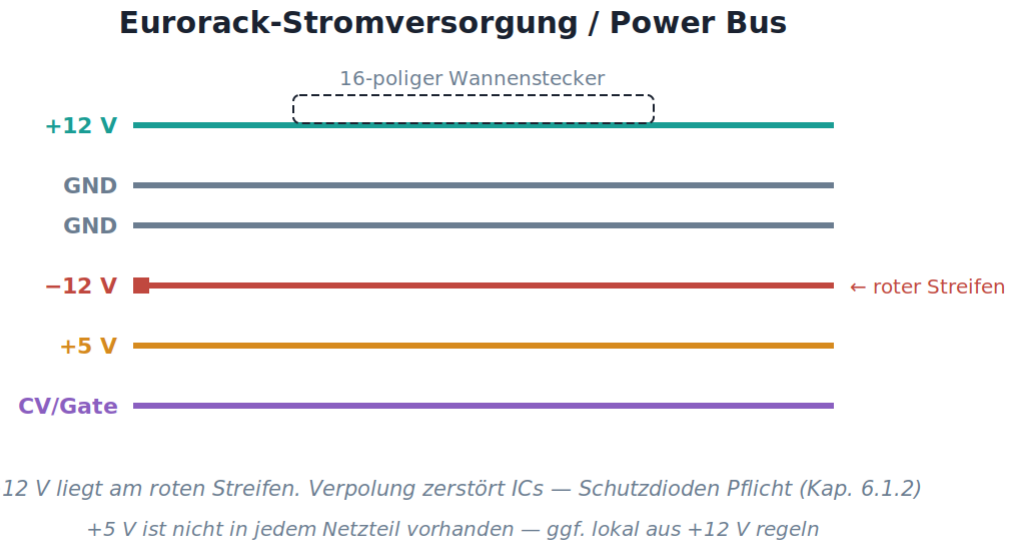


Abb. 6: Eurorack-Stromversorgung

Abb. 6: Eurorack-Stromversorgung

6.1.0 Warum ein Formatkapitel

Ein Modul ist erst dann nachbaubar, wenn es **mechanisch, elektrisch und signaltechnisch** in ein System passt. Eurorack ist der De-facto-Standard des zeitgenössischen DIY-Modularbaus — nicht weil es technisch das beste Format wäre, sondern weil dort die größte Auswahl an Modulen, Gehäusen und Bausätzen existiert. Wer eigene Module entwickelt (Teil 8), entwickelt praktisch immer gegen diese Spezifikation.

Historische Einordnung: Eurorack wurde 1995 von Doepfer (Dieter Doepfer) mit dem A-100-System eingeführt. Das Format übernimmt die Mechanik der 19-Zoll-Industrienorm, definiert aber eigene Konventionen für Strom und Signale. Es ist ein **offener Standard** ohne Lizenzgebühren — das ist der Grund für die Explosion an Herstellern und DIY-Projekten ab etwa 2010.

6.1.1 ▶️ E — Mechanik: HP, U, Tiefe

Drei Maße muss man kennen:

- **Höhe: 3 HE (3U)** — die Frontplatte ist **128,5 mm** hoch. (Achtung: „3U" bezeichnet die Norm-Höheneinheit; die tatsächliche Frontplattenhöhe liegt knapp unter dem theoretischen Maß, damit das Modul in die Schiene passt.)
- **Breite: HP (Horizontal Pitch)** — **1 HP = 5,08 mm** (= 0,2 Zoll). Module sind ganzzahlige Vielfache: 2 HP, 4 HP, 8 HP, 12 HP usw. Ein typisches Case fasst 84 HP oder 104 HP pro Reihe.
- **Tiefe** — nicht genormt, aber praktisch entscheidend. Flache Cases nehmen oft nur 25–40 mm; „Skiff"-Gehäuse sind besonders flach. **Häufigster Anfängerfehler:** ein tiefes Modul in ein flaches Case bestellen.

▶️ **I — Befestigung.** Die Frontplatte wird mit M3-Schrauben in Gewindeschienen oder Gleitmuttern verschraubt. Die Bohrungen liegen in Ovallöchern, damit HP-Toleranzen ausgeglichen werden können. Bei eigenen Frontplatten (Teil 5.3, Schichtwerk-Fertigung) unbedingt Ovallöcher vorsehen — starre Rundlöcher führen bei mehreren Modulen nebeneinander zu Spannungen und Verkanten.

6.1.2 ▶️ I — Die Stromversorgung: ±12 V, +5 V

Eurorack verteilt Strom über ein **Busboard** mit 16-poligen Wannensteckern:

Schiene	Zweck	Anmerkung
+12 V	analoge Positiv-Rail	Hauptversorgung
−12 V	analoge Negativ-Rail	für symmetrische Audio-/CV-Signale
GND	Masse	mehrere Pins
+5 V	Digital-Rail	**nicht in jedem Netzteil**

Schiene	Zweck	Anmerkung
		vorhanden!
CV / Gate (2 Pins)	optionaler Bus	von Doepfer vorgesehen, kaum genutzt

Der berüchtigte rote Streifen. Das Flachbandkabel hat an einer Seite einen roten Streifen — dieser markiert **–12 V**. Beim Modul liegt –12 V an der Seite mit der Markierung „–12" bzw. dem Punkt am Wannenstecker.

> **Verpolungsschutz — die teuerste Falle im Hobby.** Wird das Kabel um 180° verdreht eingesteckt, liegt +12 V dort, wo –12 V erwartet wird. Ohne Schutz zerstört das in Sekunden ICs. Zwei Schutzmaßnahmen gehören in **jedes** Eigenbau-Modul: 1. **Verpolungsdioden** in Reihe (Schottky, z. B. 1N5817) — einfach, kostet ~0,3 V Spannungsabfall pro Rail. 2. **Verpolungsdioden gegen Masse** in Sperrrichtung plus Sicherung — schließt bei Verpolung kurz und löst die Sicherung aus.
>
> Besser noch: **verpolungssichere Wannenstecker** mit Nase (Shrouded Header) verwenden. Kostet Cent, spart Chips.

+5 V ist nicht garantiert. Viele analoge Netzteile liefern nur ±12 V. Ein Modul, das +5 V vom Bus erwartet, funktioniert dann nicht. Deshalb erzeugen gut konstruierte Digital-Module ihre 5 V **lokal** aus +12 V (LDO-Regler, z. B. 7805 oder moderner LM1117/AMS1117) statt sich auf den Bus zu verlassen.

6.1.3 ▶️ I — Strombudget berechnen

Jedes Modul zieht Strom auf jeder Rail. Die Summe muss unter der Netzteilleistung bleiben — **mit Reserve**.

Rechenregel:

Die Rails werden **getrennt** gerechnet. Ein Netzteil mit „1500 mA" hat typischerweise 1500 mA auf +12 V **und** 1500 mA auf –12 V — nicht 1500 mA insgesamt.

Reserve: Mindestens **20–30 % Puffer** einplanen. Gründe: - Einschaltstromspitzen (Inrush) beim Hochfahren, besonders bei Digitalmodulen mit großen Pufferkondensatoren. - Herstellerangaben sind oft Typwerte, keine Maxima. - Nachrüstung: das nächste Modul kommt bestimmt.

Typische Stromaufnahmen (Größenordnung):

Modultyp	+12 V	–12 V	Bemerkung
Passiv (Multiple, Attenuator)	0	0	kein Anschluss nötig
Einfacher	20–40 mA	20–40 mA	OpAmp-basiert

Modultyp	+12 V	−12 V	Bemerkung
analoger VCA/Mixer			
Analoger VCO	30–70 mA	30–70 mA	
Analoges Filter	20–50 mA	20–50 mA	
Digitalmodul (ARM/DSP)	80–250 mA	10–30 mA	asymmetrisch!
Modul mit Display/LEDs	+ 20–100 mA	—	LEDs summieren sich

Asymmetrie beachten: Digitalmodule ziehen fast allen Strom auf +12 V (dort sitzt der Regler für 3,3/5 V), während −12 V kaum belastet wird. Ein System mit vielen Digitalmodulen kann also die +12-V-Rail erschöpfen, während −12 V halb leer bleibt.

6.1.4 ▶️ I — Signalpegel und Impedanzen

Hier liegt die zweite große Quelle von Missverständnissen: Eurorack kennt **keine** streng normierten Pegel, aber klare Konventionen.

Signalart	üblicher Bereich	Bemerkung
Audio	±5 V (10 Vpp)	manche Module bis ±10 V; deutlich heißer als Line-Pegel
CV unipolar	0 … +8 V (oder 0…+10 V)	Hüllkurven, Tonhöhe
CV bipolar	−5 … +5 V	LFOs, Modulation
Tonhöhen-CV	1 V/Oktave	Teil 4.1
Gate	0 V / +5 V (bis +10 V)	Schaltschwelle meist ~1–2,5 V
Trigger	kurzer Impuls, +5 V	typ. 1–10 ms

Impedanzkonvention: Ausgänge niederohmig (typ. **1 kΩ** Schutzwiderstand in Reihe), Eingänge hochohmig (typ. **100 kΩ**). Das erlaubt, einen Ausgang über ein passives Multiple auf mehrere Eingänge zu verteilen, ohne dass der Pegel merklich einbricht.

▶️ **E — Die Konsequenz für die Praxis:** Eurorack-Audio ist **viel lauter** als Studio-Line-Pegel. Ein Modularausgang direkt in ein Mischpult gespeist übersteuert dort. Man braucht ein **Ausgangsmodul** (Output/Line-Interface), das den Pegel um etwa 12–20 dB absenkt und oft symmetriert. Umgekehrt braucht externes Audio ein **Eingangsmodul**, das den Pegel anhebt.

Passive Multiples vs. gepufferte: Ein passives Multiple (nur zusammengelötete Buchsen) reicht für Gates und Audio meist. Für **Tonhöhen-CV** an mehrere Ziele sollte man **gepufferte Multiples** verwenden — sonst teilt sich der Ausgangswiderstand mit den

Eingangswiderständen, die Spannung sinkt leicht, und das VCO-Tracking wird ungenau (hörbare Verstimmung).

6.1.5 Die häufigsten Fallen (Kurzliste)

1. **Flachbandkabel verdreht** → Verpolungsschutz einbauen, gekennzeichnete Stecker nutzen.
2. **Tiefe des Moduls nicht geprüft** → passt nicht ins Skiff.
3. **+5 V erwartet, aber nicht vorhanden** → lokal regeln.
4. **Strombudget zu knapp** → 20–30 % Reserve.
5. **Zu viele Module an einem Busboard-Abgang** → Spannungsabfall auf dem Board; Rails bei Vollausbau nachmessen.
6. **Tonhöhen-CV passiv gesplittet** → Tracking-Fehler; gepuffertes Multiple.
7. **Modulausgang direkt ins Mischpult** → Übersteuerung; Ausgangsmodul.
8. **Masseschleifen** über mehrere Cases/Netzteile → Brummen (Teil 1.5).

6.1.6 ▶️ E — Was man zum Start braucht

Die minimale spielbare Konfiguration:

1. **Case + Netzteil** (mit ausreichend HP und Strom, Tiefe beachten)
2. **Klangquelle** — VCO (oder ein Modul mit mehreren Stimmen)
3. **Filter** — VCF
4. **Hüllkurve + VCA** (oft in einem Modul kombiniert)
5. **Modulationsquelle** — LFO
6. **Steuerung** — MIDI-to-CV-Interface oder Sequencer
7. **Ausgang** — Output-Modul für den Anschluss ans Mischpult/Interface
8. **Utilities** — Multiples, Attenuatoren, Mixer (werden konsequent unterschätzt)

Der klassische Anfängerfehler: zu viele Klangquellen, zu wenige **Utilities**. Ein Modularsystem lebt von Attenuatoren, Mixern, Multiples und Offset-Modulen — sie sind unspektakulär, aber ohne sie lassen sich die spannenden Module nicht sinnvoll verschalten (Teil 4.7).

6.1.7 Verknüpfung

- **Andere Formate** (Serge/Banana, Buchla, MU, Kosmo, Frac): Teil 6.2. **Interoperabilität/Pegelanpassung:** Teil 6.3.
- **Frontplatten und Cases selbst fertigen:** Teil 5.3 (Schichtwerk-Integration: 3D-Druck, Laser, Aluminium).
- **Eigene Module entwickeln:** Teil 8 (KiCad, PCB, Panel).
- **Tool: T5 Eurorack-Strom-/HP-Kalkulator** (Modulliste, Rail-Summen, Reserve-Warnung, HP-Belegung).

- **Utilities im Detail:** Teil 4.7. **Masse/Brummen:** Teil 1.5.
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: aktuelle Doepfer-A-100-Spezifikationsdetails und Maßangaben gegen Primärquelle (doepfer.de Technische Details); typische Netzteilgrößen/Preise. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 6.2–6.4 — Andere Formate, Interoperabilität, Open-Hardware-Landschaft

Doppelspur. ▶️ E: welche Systeme es neben Eurorack gibt und wie man zwischen ihnen übersetzt. ▶️ I: die technischen Unterschiede, die beim Übergang zählen. Voraussetzung ist Teil 6.1.

Teil 6.2 — Andere Formate

6.2.1 ▶️ E — Warum es mehr als Eurorack gibt

Eurorack (6.1) ist heute der verbreitetste Standard, aber nicht der einzige und nicht der älteste. Jedes Format verkörpert eine **Entwurfsphilosophie**: andere Buchsen, andere Pegel, andere Ergonomie — und damit eine andere Musikpraxis. Wer die Unterschiede kennt, versteht auch, warum bestimmte Klänge und Spielweisen an bestimmte Formate gebunden sind.

6.2.2 Die wichtigsten Formate im Vergleich

Format	Höhe	Buchse	Strom	Signalpegel	Charakter
Eurorack	3U (128,5 mm)	3,5 mm Klinke	±12 V	±5 V Audio, 1V/Okt	größte Auswahl, dicht
Serge	4U	Bananenstecker	±12 V	variabel	patch-programmierbar, stapelbar
Buchla 200/200e	eigenes	Bananenstecker (CV) + Klinke (Audio)	±15 V	10 Vpp, oft Hz/V	West Coast, getrennte CV-/Audiowelt
MU / Moog Unit (“5U”)	5,25″	1/4″ Klinke	±15 V	größer	groß, „vintage”, teuer
Frac Rak	3U (kleiner)	1/4″ Klinke	±15 V		älteres DIY-Format

Format	Höhe	Buchse	Strom	Signalpegel	Charakter
Kosmo	200 mm	1/4″ Klinke	±12 V	Eurorack-kompatibel elektrisch	DIY, große Panels, robust
Pedal/ Desktop	—	6,3/3,5 mm	divers	Instrument/ Line	eigenständige Geräte

6.2.3 ▶️ I — Die drei Unterschiede, die technisch zählen

Beim Übergang zwischen Formaten sind nicht die Maße das Problem (die löst ein Adapterkabel), sondern **drei elektrische Größen**:

1. **Buchsentyp.** Klinke (Eurorack, MU, Kosmo) vs. **Bananenstecker** (Serge, Buchla-CV). Bananen sind stapelbar (mehrere Stecker übereinander = passives Multiple) und haben eine **getrennte Masse** — ein Konzeptunterschied, kein bloßer Steckerwechsel.
2. **Versorgungsspannung.** ±12 V (Eurorack, Kosmo) vs. ±15 V (Buchla, MU, Frac). Ein ±12-V-Modul an ±15 V kann Schaden nehmen; umgekehrt fehlt Headroom. Nicht einfach umstecken.
3. **Tonhöhenstandard.** 1V/Oktave (die meisten) vs. **Hz/V** (klassisches Buchla, altes Korg/Yamaha). Diese beiden sind **nicht kompatibel** — es braucht einen aktiven Wandler (6.3.2), kein Kabel.

Teil 6.3 — Interoperabilität

6.3.1 ▶️ E — Was sich einfach verbinden lässt

- **Gleicher Pegelstandard, andere Buchse** → passives Adapterkabel (Klinke ↔ Banane). Funktioniert für Audio, Gate und 1V/Okt-CV, solange die Spannungen im selben Bereich liegen.
- **Audio zwischen Formaten** ist meist unkritisch, solange der Pegel passt — notfalls über einen Attenuator (4.7.2b) oder Verstärker anpassen.

6.3.2 ▶️ I — Was einen aktiven Wandler braucht

Übergang	Problem	Lösung
1V/Okt ↔ Hz/V	grundverschiedene Kennlinie	aktiver Wandler (Exp/Log, Teil 3.3)
±12 V ↔ ±15 V	Versorgung/Headroom	eigenes Netzteil je System; Signalpegel per Attenuator anpassen
Gate 5 V ↔ 10 V / S-Trig	Schaltschwelle/Polarität	Pegelwandler; S-Trigger (Moog, invertiert) braucht Umkehrung
Modularpegel ↔	Pegel 10–20 dB zu heiß	Ausgangsmodul (6.1.4)

Übergang	Problem	Lösung
Line/Instrument		

S-Trigger als Sonderfall: Ältere Moog-Geräte verwenden „Switch Trigger" — ein *nach Masse schaltendes* Signal statt einer positiven Spannung. Ein moderner V-Trigger (positive Gate-Spannung) muss dafür invertiert werden. Ein häufiger Stolperstein beim Verbinden alter und neuer Geräte.

6.3.3 ▶️ I — MIDI, USB und die digitale Brücke

- **MIDI-to-CV** übersetzt Notennummern in 1V/Okt-CV und Gate (Teil 4.9). Die zentrale Brücke zwischen Klaviatur/Sequencer-Welt und Modularsystem.
- **CV-to-MIDI** für die Gegenrichtung.
- **USB/Class-Compliant** Interfaces binden das System an den Rechner (DAW, VCV Rack, Teil 7.6).
- **Clock-Synchronisation** (analoge Clock vs. MIDI-Clock vs. DIN-Sync) ist ein eigenes Kompatibilitätsthema — Taktteiler/-wandler gleichen die Standards an.

Teil 6.4 — Die Open-Hardware-Landschaft

6.4.1 ▶️ E — Warum diese Landschaft existiert

Der DIY-Synthesizerbau lebt von einer ungewöhnlich offenen Kultur: Schaltpläne, Layouts und Bauanleitungen werden geteilt, kommentiert und weiterentwickelt. Diese Offenheit ist kein Zufall, sondern hat konkrete Wurzeln — pädagogische Projekte, auslaufende Patente auf Grundschaltungen und eine Community, die Wissen als gemeinsames Gut behandelt. Für Nachbauer bedeutet das: Fast jede hier behandelte Schaltung existiert bereits als dokumentiertes, offenes Projekt.

6.4.2 Kuratierte Projekt-Landschaft

> **Hinweis:** Die folgende Übersicht nennt etablierte Quellen als Orientierung. Verfügbarkeit, Aktivität und Links ändern sich — alle Einträge sind vor einer Veröffentlichung gegen den aktuellen Stand zu prüfen. **[zu verifizieren: sämtliche Projekte, Links, Aktivitätsstatus]**

Projekt/Quelle	Beitrag	Charakter
MFOS (Music From Outer Space, Ray Wilson)	Lehrprojekte, „Noise Toaster", komplette Synths	pädagogisch, gut dokumentiert, Ausgangspunkt vieler Einsteiger
YuSynth (Yves Usson)	umfangreiche Modulsammlung, VCO/VCF/…	klassische Nachbauten, bewährt
Ken Stone / CGS (Cat Girl	ungewöhnliche Module,	experimentell

Projekt/Quelle	Beitrag	Charakter
Synth)	West-Coast-nah	
Music Thing Modular (Tom Whitwell)	Turing Machine (Zufall), einfache Utilities	minimalistisch, offen
Mutable Instruments (Émilie Gillet)	quelloffene digitale/hybride Module, Code frei	prägend für die hybride Welle; Firmware offen
Befaco	offene Bausätze, Utilities	Kit-orientiert, community-nah
Nonlinearcircuits (NLC)	eigenwillige, chaosnahe Schaltungen	avantgardistisch
Thonk	Bausätze und Bauteile (Vertrieb)	Bezugsquelle, kein Entwickler
Lunetta / Nicolas Collins	CMOS-basierte Klangbastelei (40106 etc.)	Einstieg ohne Präzisionsanspruch (2.3.2)

6.4.3 ▶️ I — Wie man ein Projekt bewertet

Nicht jedes offene Projekt ist gleich gut nachbaubar. Prüfkriterien (vgl. 8.5.1):

1. **Vollständigkeit** — Schaltplan **und** Layout **und** BOM **und** Abgleichanleitung? Fehlt eines, wird der Nachbau schwierig.
2. **Aktualität der Bauteile** — sind die verwendeten Chips noch beschaffbar, oder basiert das Projekt auf längst abgekündigten ICs (2.3.7)?
3. **Dokumentierte Erfolge** — haben andere es nachgebaut und bestätigt? Ein Forenthread mit gelungenen Nachbauten ist wertvoller als ein glänzendes Datenblatt.
4. **Lizenz** — ist die Weiterverwendung erlaubt und geklärt (8.5.2)?
5. **Support/Community** — gibt es einen Ort, an dem Fragen beantwortet werden?

6.4.4 ▶️ E — Der Platz dieses Buches in der Landschaft

Dieses Werk versteht sich nicht als konkurrierendes Projekt, sondern als **Landkarte und Fundament**: Es erklärt die Prinzipien, auf denen die genannten Projekte beruhen, und macht sie damit lesbar und beurteilbar. Wer die Teile 3 und 4 verstanden hat, kann einen MFOS- oder YuSynth-Schaltplan lesen, seine Dimensionierung nachvollziehen und ihn gezielt modifizieren — statt ihn nur nachzulöten.

Der Auslöser dieses Buches — Ray Wilsons *Make: Analog Synthesizers* mit dem „Noise Toaster" — steht selbst in dieser Tradition: ein Lehrgerät, an dem sich die Prinzipien erfahren lassen. Dieses Werk führt den Gedanken weiter, indem es die Prinzipien vom einzelnen Lehrgerät ablöst und systematisch, bilingual und mit interaktiven Werkzeugen aufbereitet.

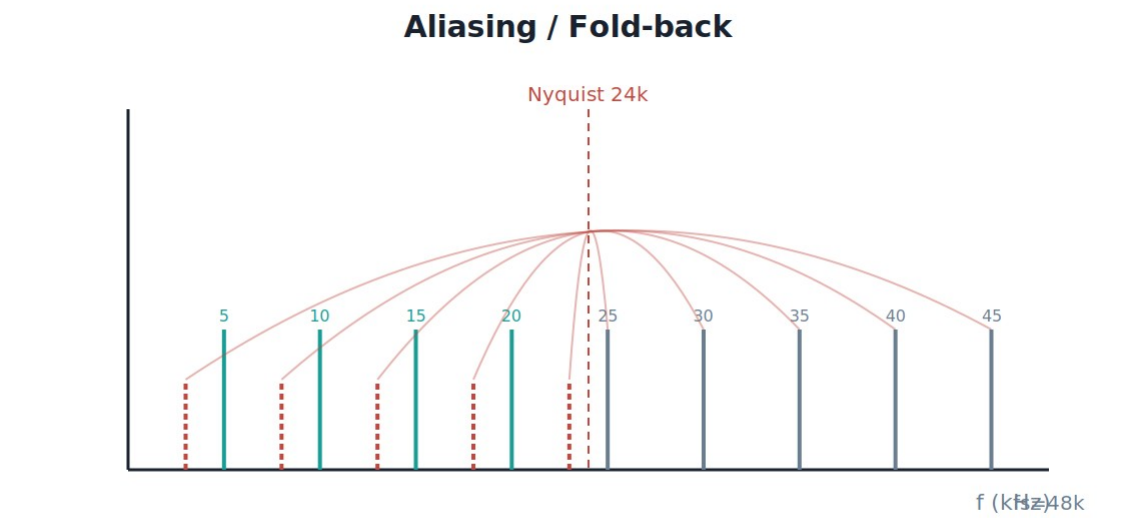
Verknüpfung (6.2–6.4)

- **Eurorack-Grundlagen:** Teil 6.1. **Pegel/Impedanz:** Teil 1.2–1.3.

- **Aktive Wandler (Exp/Log):** Teil 3.3. **MIDI-CV:** Teil 4.9.
- **Ein Projekt selbst veröffentlichen:** Teil 8.5.
- **Software-Modularsystem zum Ausprobieren:** Teil 7.6 (VCV Rack).
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: alle genannten Projekte, Personen, Links und Aktivitätsstatus gegen aktuelle Primärquellen; Formatspezifikationen (Serge/Buchla/MU-Maße, Spannungen). Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis und REGEL QUELLEN-SERIOSITÄT.

Teil 7 — Hybrid und Digital

Doppelspur. ▶️ E: was digital besser kann, was analog bleibt und warum die meisten heutigen Module hybrid sind. ▶️ I: Mikrocontroller-Plattformen, DAC/ADC-Dimensionierung, DSP-Grundlagen und die Aliasing-Frage. Dieser Teil setzt Teil 1–6 voraus.



ertöne über Nyquist falten unharmonisch zurück (30k→18k, 40k→8k) — der analoge VCO hat das nicht (Kap. 7.3

Abb. 7: Aliasing

Abb. 7: Aliasing

7.1 Warum digital — und wo analog bleibt

7.1.1 ▶️ E — Die ehrliche Gegenüberstellung

Die Debatte „analog vs. digital" wird oft ideologisch geführt. Sachlich haben beide klar benennbare Stärken:

Kriterium	Analog	Digital
Reproduzierbarkeit	Bauteiltoleranzen, Drift	exakt, presetfähig
Komplexität pro Bauteil	jede Stimme kostet Hardware	Polyfonie in Software
Speicher/Presets	schwierig (VC-Potis nötig)	trivial
Aliasing	existiert nicht	zentrales Problem (7.3.3)
Sättigung/Übersteuerung	weich, oft erwünscht	hart, meist unerwünscht
Kosten bei hoher Funktionsdichte	steigen linear	fast konstant
Latenz	null	Puffer + Wandlung
Entwicklungszyklus	löten, messen	kompilieren, flashen

Die produktive Schlussfolgerung: Nicht „was ist besser", sondern **welche Aufgabe gehört wohin**. In der Praxis hat sich eine klare Arbeitsteilung herausgebildet:

- **Analog bleibt** typischerweise der **Audiopfad** — Filter, VCA, Sättigung. Dort ist das nichtlineare Verhalten Teil des Klangs.
- **Digital wird** typischerweise die **Steuerung** — Sequencer, MIDI-Interface, Modulationsquellen, Presets, Menüführung, Zufall.

Das ist die **Hybrid-Architektur** (7.5) und beschreibt die Mehrheit heutiger Eurorack-Module.

7.1.2 ▶️ I — Was digital echt schwerer ist

Zwei Punkte, die in Werbetexten selten stehen:

1. **Aliasing** (7.3.3) — ein digital erzeugter Sägezahn ist ohne Gegenmaßnahme *falsch*: Obertöne oberhalb der halben Abtastrate falten sich in den hörbaren Bereich zurück und erzeugen unharmonische Störtöne. Der analoge VCO hat dieses Problem prinzipiell nicht (4.1.5). Gute digitale Oszillatoren erfordern erheblichen Aufwand (bandbegrenzte Verfahren).
2. **Quantisierung von CV** — ein 12-Bit-DAC über einen 10-V-Bereich liefert 2,44 mV Schrittweite. Bei 1 V/Oktave sind das rund **2,9 Cent** pro Schritt — hörbar als Stufigkeit bei langsamen Glissandi. Für saubere Tonhöhen-CV braucht es 16 Bit oder mehr (7.3.1).

7.2 Mikrocontroller im Modul

7.2.1 ▶️ E — Die Plattformen

Plattform	Kern	Stärke	Typischer Einsatz
Arduino (AVR)	8-Bit, 16 MHz	einfachster Einstieg, riesige Community	Sequencer, MIDI-CV, Logik
Teensy 4.x	ARM Cortex-M7, 600 MHz	sehr schnell, Audio-Library	Audio-DSP, Sampler
Daisy Seed	ARM Cortex-M7 + Codec	**für Audio gebaut**: Codec, SDRAM an	Effekte, digitale Oszillatoren

Plattform	Kern	Stärke	Typischer Einsatz
		Bord	
RP2040 (Pico)	Dual Cortex-M0+, PIO	billig, **PIO** für exakte Timings	CV-Erzeugung, Gate-Logik, Utility
STM32	ARM, breite Familie	industrieller Standard, viel Peripherie	kommerzielle Module
ESP32	Xtensa + WLAN/BT	Funk an Bord	vernetzte/ experimentelle Module

▶️ **E — Einstiegsempfehlung:** Für **CV/Gate-Aufgaben** (Sequencer, Quantizer, LFO, Zufall) ist der **RP2040** derzeit die günstigste und flexibelste Wahl. Für **Audio-DSP** (Delay, Reverb, digitale Oszillatoren) ist **Daisy Seed** der direkteste Weg, weil Codec und Speicher bereits verbaut sind [zu verifizieren: aktuelle Verfügbarkeit/Preise].

7.2.2 ▶️ I — Das RP2040-PIO-Argument

Der RP2040 besitzt **PIO** (Programmable I/O) — kleine Zustandsautomaten, die unabhängig vom Hauptprozessor zyklusgenaue Signale erzeugen. Für Synth-Anwendungen bedeutet das: **jitterfreie Gates und Clocks**, unabhängig davon, was die CPU gerade tut. Auf klassischen Mikrocontrollern erzeugt jede Interrupt-Kollision Timing-Jitter, der bei rhythmischen Anwendungen hörbar wird.

7.2.3 ▶️ I — Integration in die Analogwelt

Ein Mikrocontroller läuft mit 3,3 V (oder 5 V), die Modularwelt mit ±12 V und bipolaren Signalen. Vier Anpassungen sind Pflicht:

1. **Versorgung:** 3,3/5 V lokal aus +12 V regeln (6.1.2), nicht auf +5 V vom Bus verlassen.
2. **CV-Eingang skalieren:** ±5 V (oder −10…+10 V) auf 0…3,3 V abbilden — Spannungsteiler plus Offset, meist mit einem OpAmp als Summierer (3.1.2d). **Schutzdioden** gegen die Rails nicht vergessen; ein versehentlich eingesteckter 12-V-Ausgang zerstört sonst den ADC-Pin.
3. **CV-Ausgang skalieren:** DAC-Ausgang 0…3,3 V auf den gewünschten Bereich verstärken/verschieben (OpAmp).
4. **Störentkopplung:** Digitale Schaltflanken koppeln in Analogstufen (1.5.1). Getrennte Masseflächen, Abblockung, ggf. Ferritperle (2.4.2).

7.3 DAC, ADC und digitale CV

7.3.1 ▶️ I — Auflösung: die Cent-Rechnung

Für Tonhöhen-CV ist die Auflösung entscheidend. Bei einem Ausgangsbereich von 10 V und 1 V/Oktave:

Bittiefe	Stufen	Schrittweite	Tonhöhenauflösung
8 Bit	256	39,1 mV	46,9 Cent
10 Bit	1.024	9,77 mV	11,7 Cent
12 Bit	4.096	2,44 mV	2,9 Cent
14 Bit	16.384	0,61 mV	0,73 Cent
16 Bit	65.536	0,15 mV	0,18 Cent

Bewertung: Das menschliche Gehör unterscheidet im günstigen Fall etwa **5–6 Cent**. 12 Bit (2,9 Cent) sind damit für gespielte Töne gerade ausreichend, für langsame Glissandi aber hörbar gestuft. **16 Bit** ist der praktische Standard für Tonhöhen-CV. Für Modulations-CV (Filter, Amplitude) genügen oft 12 Bit.

▶️ **I — PWM als DAC-Ersatz.** Viele Mikrocontroller haben keinen echten DAC, aber PWM-Ausgänge. Ein RC-Tiefpass glättet das PWM-Signal zu einer Gleichspannung. Kompromiss: Je stärker geglättet (bessere Auflösung, weniger Restwelligkeit), desto **träger** die Reaktion. Für Tonhöhen-CV ist das grenzwertig; für langsame Modulation brauchbar. Echte DACs (MCP4728, DAC8565 o. ä.) sind der saubere Weg.

7.3.2 ▶️ I — Abtastung und das Nyquist-Kriterium

Ein digitales System tastet das Signal mit der **Abtastrate** ab. Das Abtasttheorem (Nyquist-Shannon) besagt:

Nur Frequenzen **unterhalb der halben Abtastrate** (, die Nyquist-Frequenz) sind rekonstruierbar. Bei 48 kHz Abtastrate also alles bis 24 kHz — das deckt den Hörbereich ab.

7.3.3 ▶️ I — Aliasing: das Kernproblem digitaler Oszillatoren

Was passiert mit Frequenzen **oberhalb** der Nyquist-Grenze? Sie verschwinden nicht, sondern **falten sich zurück** in den hörbaren Bereich:

Beispiel: Abtastrate 48 kHz, Nyquist 24 kHz. Ein Sägezahn mit Grundton 5 kHz hat Obertöne bei 10, 15, 20, 25, 30 kHz … Die ersten vier liegen korrekt. Danach faltet sich alles zurück:

Oberton	echte Frequenz	erscheint als
4.	20 kHz	20 kHz (korrekt)
5.	25 kHz	23 kHz
6.	30 kHz	18 kHz
7.	35 kHz	13 kHz
8.	40 kHz	**8 kHz**
9.	45 kHz	**3 kHz**

Die gefalteten Töne stehen in **keinem harmonischen Verhältnis** zum Grundton — und sie wandern beim Spielen einer Melodie in die *falsche* Richtung (steigt der Grundton, sinken die Aliasse). Das Ergebnis klingt schrill, „digital", metallisch-falsch.

Gegenmaßnahmen (die Kunst des digitalen Oszillatorbaus):

Verfahren	Prinzip	Aufwand
Oversampling	intern mit 4–16× Rate rechnen, dann filtern	hoch (Rechenzeit)
BLIT/BLEP	Sprungstellen bandbegrenzt „reparieren"	mittel, Standard
Wavetable	vorberechnete, pro Oktave bandbegrenzte Tabellen	Speicher statt Rechenzeit
Additiv	nur Obertöne unter Nyquist erzeugen	teuer, aber exakt

Der **analoge** VCO hat diese Klasse von Problemen nicht — ein häufig übersehener, sachlicher Vorteil analoger Klangerzeugung (4.1.5).

7.3.4 ▶️ I — Rekonstruktion und Anti-Aliasing-Filter

- **Vor** dem ADC: Tiefpass, der alles über entfernt (sonst faltet sich Eingangsrauschen zurück).
- **Nach** dem DAC: Rekonstruktionstiefpass, der die Treppenstufen glättet und die Spiegelfrequenzen entfernt.

Beides sind analoge Filter (Teil 4.2, Teil 3) — die digitale Welt braucht die analoge an ihren Rändern.

7.4 DSP-Grundlagen im Modul

7.4.1 ▶️ E — Was im Modul gerechnet wird

Die drei häufigsten digitalen Effekte und ihre Kernidee:

- **Delay** — ein Ringpuffer im Speicher. Schreibzeiger und Lesezeiger mit definiertem Abstand; der Abstand ist die Verzögerungszeit. Rückkopplung (Feedback) erzeugt Wiederholungen. Direktes digitales Gegenstück zur BBD (2.3.6).
- **Reverb** — Netzwerke aus Delays und Allpassfiltern (Schroeder/Moorer-Ansatz) oder Faltung mit einer gemessenen Raumantwort.
- **Filter** — digitale Biquads; dieselbe Mathematik wie in Teil 4.2, nur in Differenzengleichungen statt in R und C.

7.4.2 ▶️ I — Der digitale Filter in einer Zeile

Ein Biquad (Zwei-Pol-Filter) ist eine Differenzengleichung:

Die Koeffizienten werden aus Cutoff und Q berechnet (die Analogie zur analogen Übertragungsfunktion aus 4.2.2 ist direkt). **Praxishinweis:** Bei sehr tiefen Cutoff-Frequenzen relativ zur Abtastrate werden Biquads numerisch instabil (Koeffizienten nahe 1); dann State-Variable-Topologien oder höhere Rechengenauigkeit verwenden.

7.4.3 ▶️ I — Festkomma vs. Fließkomma

- **Fließkomma (float)** — bequem, großer Dynamikbereich, auf modernen ARM-Kernen mit FPU schnell genug. Standardwahl heute.
- **Festkomma (int)** — nötig auf kleinen Controllern ohne FPU; erfordert manuelle Skalierung und Überlaufkontrolle.

7.5 Hybrid-Architekturen

7.5.1 ▶️ E — Die drei bewährten Muster

(a) Analoger Signalweg, digitale Steuerung. Der Klang läuft komplett analog (VCO/VCF/VCA), ein Mikrocontroller erzeugt CV, verwaltet Presets und stellt die Bedienoberfläche. Beispiele: viele moderne Desktop-Synths. **Vorteil:** analoger Klang mit Presetfähigkeit.

(b) Digitale Quelle, analoge Formung. Ein digitaler Oszillator (Wavetable, Sample) speist ein analoges Filter und einen analogen VCA. **Vorteil:** beliebige Klangquellen mit analoger Sättigung und Filterverhalten. Sehr verbreitet in aktuellen Eurorack-Modulen.

(c) Analoge Quelle, digitale Bearbeitung. Analoge Oszillatoren, danach digitale Effekte (Delay, Reverb). **Vorteil:** analoge Grundstimme plus Effekte, die analog aufwendig wären.

7.5.2 ▶️ I — Die Schnittstellen sauber halten

Bei jedem Hybrid-Entwurf sind drei Punkte kritisch:

1. **Wandlungspunkte minimieren.** Jede A/D- und D/A-Wandlung kostet Rauschabstand und Latenz. Nicht mehrfach hin- und herwandeln.
2. **Masse und Versorgung trennen** (1.5.2, 7.2.3) — der häufigste Grund für „digitales Zirpen" im Audiosignal.
3. **Latenz budgetieren.** Puffergrößen bestimmen die Verzögerung: . Bei 64 Samples und 48 kHz sind das 1,33 ms pro Puffer — für Modulation unkritisch, bei mehrfacher Kaskadierung aber spürbar.

7.6 Die Brücke zur Software

7.6.1 ▶️ E — VCV Rack und virtuelle Modularsysteme

VCV Rack ist ein Open-Source-Software-Modularsystem, das die Eurorack-Logik am Rechner nachbildet. Für dieses Buch ist es aus drei Gründen relevant:

1. **Lernwerkzeug ohne Kosten** — Patch-Logik, Signalketten und Modulverhalten lassen sich ohne einen einzigen gekauften Baustein durcharbeiten. Wer Teil 4 gelesen hat, kann dort jedes Konzept sofort ausprobieren.
2. **Entwurfswerkzeug** — eine Architektur (Teil 5.2) lässt sich erst virtuell aufbauen und beurteilen, bevor Bauteile bestellt werden.
3. **Hardware-Brücke** — mit entsprechenden Interfaces lassen sich virtuelle und physische Module verbinden [zu verifizieren: aktueller Funktionsumfang/Lizenzmodell].

Grenzen: Die Software modelliert Verhalten, nicht Bauteiltoleranzen; die Aliasing-Frage (7.3.3) und das Sättigungsverhalten analoger Stufen werden je nach Modul unterschiedlich gut nachgebildet.

7.6.2 Bezug zum eigenen Software-Strang

Die Software-Seite der Klangsynthese — DSP-Implementierung, Wavetable-Engines, WASM/Rust-Umsetzung — ist im Korpus separat als **SignalWerk/SW-Synth** entwickelt und wird hier nicht dupliziert. Dieses Buch behandelt die **Hardware-Achse**; die Berührungspunkte sind dieser Teil 7 und die Werkzeugkette (Teil 8).

7.7 Verknüpfung

- **Analoge Entsprechungen:** VCO (4.1), VCF (4.2), BBD-Delay (2.3.6).
- **Stromversorgung digitaler Module:** Teil 6.1.2 (+5 V lokal regeln), Teil 2.4.
- **Störentkopplung:** Teil 1.5.2, Teil 2.4.2.
- **Firmware-Werkzeugketten:** Teil 8.3.
- **Korpus:** Software-DSP-Strang SignalWerk/SW-Synth (getrennt geführt).
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: aktuelle Verfügbarkeit/Preise Daisy Seed, Teensy 4.x, RP2040-Boards; VCV-Rack-Funktionsumfang und Lizenzmodell; DAC-Typen und Bezugsquellen. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 8 — Entwicklung und Werkzeugkette

> **Doppelspur.** ▶️ E: die Werkzeuge, mit denen man vom Einfall zur fertigen Platine kommt — alle in freien Versionen verfügbar. ▶️ I: Simulationsmethodik, Layoutregeln für Analogtechnik, Fertigungsparameter und die Frage, was „Open Hardware veröffentlichen" konkret heißt.

8.1 Simulation: rechnen, bevor gelötet wird

8.1.1 ▶️ E — Die drei Werkzeugklassen

Werkzeug	Typ	Stärke	Kosten
Falstad Circuit Simulator	Browser, interaktiv	sofort, anschaulich, ideal zum **Lernen**	frei

Werkzeug	Typ	Stärke	Kosten
LTspice	Desktop, SPICE	Industriestandard, sehr genau, große Modellbibliothek	frei (proprietär)
ngspice / KiCad-Simulator	Desktop, SPICE	vollständig quelloffen, in KiCad integriert	frei (OSS)
QSPICE	Desktop, SPICE	neuer, schnell	frei [zu verifizieren]

▶️ **E — Empfehlung nach Zweck:** Zum **Verstehen** einer Grundschaltung (Teil 3) ist Falstad unschlagbar, weil man den Stromfluss animiert sieht und Bauteilwerte live ändert. Zum **Dimensionieren** eines realen Moduls ist LTspice oder ngspice richtig, weil dort echte Bauteilmodelle mit Toleranzen und Temperaturverhalten rechnen.

8.1.2 ▶️ I — Die vier Analysearten, die man braucht

Analyse	Frage	Anwendung im Synth
DC Operating Point	Wo liegen die Ruhespannungen?	Arbeitspunkte, Offsets prüfen
Transient (.tran)	Wie sieht das Signal über die Zeit aus?	Wellenform, Hüllkurve, Reset-Verhalten
AC Sweep (.ac)	Wie ist der Frequenzgang?	**Filterkurven** (Teil 4.2), Bode-Plot
Parameter Sweep (.step)	Wie wirkt sich ein Bauteilwert aus?	Dimensionierung, Toleranzanalyse

▶️ **I — Die Analyse, die am meisten spart:** `.step` über Bauteiltoleranzen. Statt eine Schaltung mit Idealwerten zu prüfen, lässt man Widerstände und Kondensatoren über ihre Toleranzbänder variieren. Wenn ein Filter nur mit exakt 10,00 nF funktioniert, aber nicht mit 9,5 oder 10,5 nF, ist der Entwurf untauglich — das merkt man in der Simulation in Sekunden statt nach dem Bestücken von zehn Platinen.

8.1.3 ▶️ I — Grenzen der Simulation

Die Simulation ist ein Modell, kein Ersatz für die Messung. Vier systematische Abweichungen:

1. **Modellqualität.** SPICE-Modelle spezieller Chips (OTA, CEM/AS) sind oft vereinfacht oder gar nicht verfügbar; ein LM13700-Modell bildet Sättigung und Klirr nur näherungsweise ab.
2. **Parasitäre Effekte.** Leiterbahnkapazität, Übersprechen und Masseimpedanz stehen nicht im Schaltplan — sie entstehen erst im Layout (8.2.3).
3. **Temperatur.** Die Drift des Exp-Konverters (3.3) lässt sich simulieren, wenn man sie explizit ansetzt — Standardläufe rechnen bei 27 °C.
4. **Rauschen.** SPICE kann Rauschanalyse, aber die realen Einstreuungen (1.5) sind ein Layout- und Aufbauthema.

Konsequenz: Simulieren, um die Dimensionierung zu klären; messen, um sie zu bestätigen (Teil 5.4).

8.2 Vom Schaltplan zur Leiterplatte

8.2.1 ▶️ E — KiCad als durchgehende Kette

KiCad ist eine vollständig quelloffene EDA-Suite (Schaltplan, Layout, 3D-Ansicht, Fertigungsdaten) ohne Beschränkungen bei Platinengröße oder Lagenzahl. Für dieses Buch ist es die Referenz, weil die Ergebnisse ohne Lizenzhürde weitergegeben werden können — was für Open-Hardware-Publikation (8.5) entscheidend ist.

Der Ablauf in sechs Schritten:

1. **Schaltplan zeichnen** — Symbole platzieren, verdrahten, Bauteilwerte eintragen.
2. **Annotation und ERC** — Bauteile nummerieren, elektrische Regelprüfung laufen lassen (offene Eingänge, Kurzschlüsse).
3. **Footprints zuweisen** — jedem Symbol das physische Gehäuse zuordnen (der Schritt, bei dem Anfänger die meisten Fehler machen).
4. **Layout** — Bauteile platzieren, Leiterbahnen routen, Massefläche gießen.
5. **DRC** — Design Rule Check gegen die Fertigungsvorgaben.
6. **Fertigungsdaten exportieren** — Gerber, Bohrdatei, Bestückungsdaten, BOM.

8.2.2 ▶️ I — Layoutregeln für Analogtechnik

Diese Regeln unterscheiden ein funktionierendes von einem brummenden Modul:

1. **Durchgehende Massefläche** auf einer Lage. Sie ist der kürzeste Rückweg für alle Ströme und schirmt zugleich.
2. **Abblockkondensatoren** (100 nF) direkt am Versorgungspin, Leiterbahn so kurz wie möglich (2.4.2).
3. **Analog- und Digitalbereich räumlich trennen**, Masseflächen an genau einem Punkt verbinden (1.5.2).
4. **Empfindliche Knoten kurz halten:** OTA-Eingänge, Integrator-Summierpunkt, S&H-Halteknoten. Diese Netze sind hochohmig und fangen alles ein.
5. **Keine Signalleitung unter dem Timing-Kondensator** oder parallel zu Taktleitungen führen.
6. **Sternförmige Versorgungsführung** statt Kette (1.5.2).
7. **Panel-Bauteile mechanisch entkoppeln** — Kräfte an Buchsen und Potis dürfen nicht auf Lötstellen wirken (5.3.4).
8. **Testpunkte vorsehen.** Ein paar Lötpads an kritischen Knoten (Rails, VCO-Ausgang, Hüllkurve) sparen bei der Fehlersuche viel Zeit (5.4.2).

8.2.3 ▶️ I — Fertigung: Parameter, die man kennen muss

Parameter	Übliche Vorgabe	Bemerkung
Lagenzahl	2 (Standard), 4 (bei viel Digital)	4 Lagen erlauben eine eigene Masselage
Materialstärke	1,6 mm	Standard; 1,2 mm für Panels möglich
Kupferstärke	35 µm (1 oz)	reicht für Synth-Ströme
Minimale Leiterbahn/Abstand	0,15–0,2 mm	konservativ bleiben spart Ausschuss
Bohrungen	≥ 0,3 mm	kleinere kosten Aufpreis
Lötstopplack/ Bestückungsdruck	frei wählbar	Beschriftung nutzen (5.3.2)

Dienstleister: JLCPCB, PCBWay, Aisler, Eurocircuits [zu verifizieren: aktuelle Preise, Lieferzeiten, Versand nach AT]. Für Einzelstücke sind die asiatischen Anbieter deutlich günstiger, europäische schneller und zollfrei.

▶️ **E — Der praktische Rat:** Die erste eigene Platine sollte klein und unkritisch sein (ein Multiple, ein Attenuator). Der Lernwert liegt im **Durchlaufen der Kette**, nicht in der Komplexität der Schaltung.

8.3 Firmware-Werkzeugketten

8.3.1 ▶️ E — Die Optionen nach Plattform

Plattform	Einfachster Weg	Fortgeschritten
AVR/Arduino	Arduino IDE	avr-gcc, PlatformIO
RP2040	Arduino-Core oder MicroPython	Pico-SDK (C/C++), PIO-Assembler
Teensy	Arduino + Teensyduino, Audio Library	C++ direkt
Daisy	DaisyDuino (Arduino)	libDaisy + DaisySP (C++)
STM32	STM32CubeIDE	CMSIS, HAL, bare metal

▶️ **E — PlatformIO** (VS-Code-Erweiterung) ist der pragmatische Mittelweg: eine Umgebung für viele Plattformen, mit Bibliotheksverwaltung und Versionskontrolle, ohne den Sprung in Hersteller-IDEs.

8.3.2 ▶️ I — Was in der Synth-Firmware anders ist

- **Echtzeitanforderung.** Audio-Callbacks dürfen nicht blockieren: keine dynamische Speicherallokation, keine `printf`, keine wartenden Funktionen im Audio-Pfad.
- **Determinismus vor Durchsatz.** Ein gelegentlich verpasster Puffer erzeugt ein hörbares Knacken — schlimmer als durchgehend etwas weniger Rechenleistung.

- **Kalibrierdaten** (Skalierung, Offset des CV-Eingangs) im nichtflüchtigen Speicher ablegen, statt sie fest zu kodieren.
- **Bootloader/Update-Weg** von Anfang an vorsehen; ein Modul, das zum Flashen zerlegt werden muss, wird nicht aktualisiert.

8.4 Entwurfsmethodik

8.4.1 ▶️ I — Die Reihenfolge, die Fehler früh findet

1. **Anforderung schriftlich fixieren.** Was soll das Modul können, welche Ein-/Ausgänge, welcher Pegelbereich, wie viel HP, welches Strombudget (T5)?
2. **Blockdiagramm** vor dem Schaltplan — Signalfluss und Schnittstellen klären.
3. **Kritischen Block simulieren** (8.1) — meist Filter, Exp-Konverter oder Ausgangsstufe.
4. **Steckbrett-Prototyp** nur des kritischen Teils (2.6.3) — mit dem Vorbehalt, dass Präzisionsanaloges dort schlechter läuft.
5. **Schaltplan vollständig**, ERC sauber.
6. **Layout**, DRC sauber, Fertigungsdaten prüfen (Gerber-Viewer!).
7. **Erstmuster bestücken und stufenweise testen** (5.2.4, 5.4).
8. **Dokumentieren**, dann erst Serie.

8.4.2 ▶️ I — Testprotokoll

Ein knappes, wiederholbares Protokoll pro Modul spart bei jedem weiteren Exemplar Zeit:

- **Sichtprüfung** (Bestückung, Polarität, Lötstellen).
- **Kurzschlussprüfung** der Rails **vor** dem Einschalten.
- **Stromaufnahme** messen und mit der Kalkulation (T5) vergleichen — eine deutliche Abweichung zeigt einen Fehler an.
- **Funktionstests** je Block mit definierten Eingangssignalen und erwarteten Ausgangswerten.
- **Abgleich** nach fester Reihenfolge (5.4.1).
- **Ergebnisse notieren** (Seriennummer, Trimmerstellungen, Auffälligkeiten).

8.5 Open Hardware veröffentlichen

8.5.1 ▶️ E — Was dazugehört

Ein Projekt ist erst dann nachbaubar, wenn diese Bestandteile vorliegen:

Bestandteil	Zweck
Quelldateien (KiCad-Projekt)	Änderbarkeit — der Kern von „offen"
Fertigungsdaten (Gerber, Bohrdatei)	direkte Bestellbarkeit
BOM mit Bestellnummern	Beschaffung ohne Rätselraten
Aufbauanleitung	Reihenfolge, Stolpersteine

Bestandteil	Zweck
Abgleichanleitung	ohne sie funktioniert kein analoger VCO
Panel-Dateien (SVG/DXF)	Fertigung der Frontplatte (5.3)
Firmware + Quellcode	bei digitalen Modulen
Lizenzangabe	Rechtssicherheit für Nachbauer

Der häufigste Mangel in veröffentlichten DIY-Projekten ist die fehlende **Abgleichanleitung** — die Schaltung ist dokumentiert, aber ohne Kalibrierprozedur bleibt der Nachbau verstimmt.

8.5.2 ▶️ I — Lizenzen für Hardware

Software-Lizenzen passen nur bedingt auf Hardware, weil Leiterplatten kein Urheberrecht im Sinne von Quellcode genießen. Etabliert haben sich:

Lizenz	Charakter	Anmerkung
CERN-OHL-S	stark reziprok (Copyleft)	Änderungen müssen offen bleiben
CERN-OHL-W	schwach reziprok	erlaubt proprietäre Kombination
CERN-OHL-P	permissiv	keine Rückgabepflicht
CC BY-SA	verbreitet, aber für Hardware unscharf	für Dokumentation gut geeignet
TAPR OHL	älter	seltener geworden

Praxis: Für die **Dokumentation** eine CC-Lizenz, für die **Hardware-Quelldateien** eine CERN-OHL-Variante, für **Firmware** eine Software-Lizenz (GPL/MIT/Apache). Diese Aufteilung ist in der Szene üblich und rechtlich sauberer als eine Einheitslizenz.

8.5.3 ▶️ E — Wo veröffentlicht wird

- **Repository** (Git) für Quelldateien und Firmware — mit Tags für Revisionen.
- **Projektseite** mit Bildern, Demo und Anleitung.
- **Archivierung mit DOI** für dauerhafte Zitierbarkeit von Dokumentation und Datensatz.
- **Community-Plattformen** der Szene für Sichtbarkeit und Rückmeldungen [zu verifizieren: aktuell relevante Plattformen].

▶️ **I — Reproduzierbarkeit prüfen:** Der Test einer Veröffentlichung ist nicht, ob sie vollständig *aussieht*, sondern ob eine dritte Person allein damit ein funktionierendes Modul bauen kann. Wer die Möglichkeit hat, lässt genau das einmal jemanden versuchen, bevor er das Projekt als fertig bezeichnet.

8.6 Verknüpfung

- **Schaltungen zum Simulieren:** Teil 3 (Grundschaltungen), Teil 4 (Module).
- **Mechanik und Panels:** Teil 5.3. **Formatvorgaben:** Teil 6.1.

- **Firmware-Zielplattformen:** Teil 7.2. **Strombudget:** Tool T5.
- **Fehlersuche am Erstmuster:** Teil 5.4.2.
- **Die Open-Hardware-Landschaft als Vorbild:** Teil 6.4.
- **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: aktuelle Fertigungspreise und Lieferzeiten, KiCad-Versionsstand, QSPICE-Status, relevante Community-Plattformen. Web-Audit gemäß REGEL Lehrbuch-Verhältnis.

Teil 9 — Praxis-Kompendium

Nachschlageteil. Kein Lesekapitel, sondern Referenz: kanonische Grundschaltungen, Fehlersuchbäume, Glossar und ein kuratiertes Projektregister. Alle Verweise führen zurück in die erklärenden Kapitel.

9.1 Schaltungs-Kochbuch

Die wiederkehrenden Grundschaltungen als kompakte Referenz. Jede ist im genannten Kapitel hergeleitet; hier stehen nur Zweck, Kernformel und Stolperstein.

9.1.1 OpAmp-Grundschaltungen (Teil 3.1)

Schaltung	Kernformel	Stolperstein
Impedanzwandler	V = 1	für gepufferte Multiples, EG-Ausgang
Nichtinvertierend	V = 1 + Rf/R1	V immer ≥ 1
Invertierend	V = −Rf/R1	virtuelle Masse am −Eingang
Summierer	Uout = −Rf·Σ(Ui/Ri)	CV-Mixer DC-koppeln!
Integrator	dUout/dt = −Uin/(RC)	10-M-Widerstand gegen Drift
Komparator + Hysterese	UHyst = Uout·R1/(R1+R2)	ohne Hysterese Prellen

9.1.2 Der Exponentialkonverter (Teil 3.3, 4.1.2)

Zweck: lineare CV → exponentielle Frequenz (1V/Okt). **Kern:** IC = IS·e^(UBE/UT); Eingangsteiler auf ~17,9 mV/Okt; Matched Pair; Tempco +3300 ppm/K thermisch gekoppelt. **Stolperstein:** ohne Tempco und thermische Kopplung driftet das Tracking; Summierpunkt niederohmig halten.

9.1.3 VCO-Kern (Teil 4.1)

Zweck: spannungsgesteuerte Frequenz. **Kern:** f = IC/(C·ΔUSchwelle); Integrator lädt, Komparator setzt zurück; Sägezahn primär, Rest abgeleitet. **Stolperstein:** Reset-Geschwindigkeit begrenzt die Höchstfrequenz; Hi-Freq-Trim.

9.1.4 VCF (Teil 4.2)

Zweck: spannungsgesteuerte Klangfarbe. **Kern:** fc = 1/(2πRC) je Stufe; Resonanz durch Rückkopplung; Selbstoszillation bei hoher Resonanz. **Stolperstein:** OTA-Eingang übersteuert → Klirr; Cutoff-Tracking braucht Exp-Konverter.

9.1.5 VCA (Teil 4.3)

Zweck: spannungsgesteuerte Lautstärke. **Kern:** Iout = gm·Uin; gm ∝ IABC; linear (Modulation) vs. exponentiell (Lautstärke). **Stolperstein:** Control-Feedthrough → Klick; Eingangsteiler gegen Klirr; Offset trimmen.

9.1.6 EG (Teil 4.4)

Zweck: zeitlicher Verlauf. **Kern:** U(t) = UZ(1−e^(−t/τ)), τ = RC; Umschaltung bei ~95 %. **Stolperstein:** Puffer mit kleinem Bias-Strom; Folienkondensator; Sustain ist Pegel, keine Zeit.

9.1.7 Utilities (Teil 4.7)

Schaltung	Kern	Kapitel
Attenuverter	OpAmp, Poti zwischen inv./nichtinv.	4.7.2b
Slew Limiter	RC + Puffer, getrennte Rise/Fall	4.7.2e
Sample & Hold	CD4066 + Haltekondensator + FET-Puffer	4.7.2f / 3.4.2
Ringmodulator	AD633 (4-Quadranten) oder Diodenring	4.7.2h
Rauschquelle	Zener/Transistor + hohe Verstärkung	4.6.2

9.2 Fehlerkatalog und Troubleshooting-Bäume

9.2.1 Grundprinzip

Halbiere den Signalweg (5.4.2). Versorgung zuerst, dann Signalverfolgung von der Mitte aus, dann Sichtprüfung, dann Bauteile einzeln.

9.2.2 Fehlerbaum „kein Ton"

```
Kein Ton
├─ Rails vorhanden? (DMM an IC-Pins)
│   ├─ nein → Verpolung? Sicherung? Netzteil? Kurzschluss?
│   └─ ja ↓
├─ VCO schwingt? (Oszilloskop am VCO-Ausgang)
│   ├─ nein → Timing-C? Reset-Schalter? Versorgung am VCO-IC?
│   └─ ja ↓
├─ Signal kommt durch VCF? (Ein-/Ausgang vergleichen)
│   ├─ nein → Cutoff ganz zu? OTA-Versorgung? Verdrahtung?
```

```
│   └─ ja ↓
├─ VCA öffnet? (Steuerspannung am VCA prüfen)
│   ├─ nein → EG liefert CV? Gate kommt an? Offset?
│   └─ ja ↓
└─ Ausgangsstufe? (Pegel, Koppel-C, Buchse)
```

9.2.3 Symptom-Ursache-Tabelle

Symptom	Wahrscheinlichste Ursachen (Reihenfolge)
Kein Ton	Versorgung → VCO steht → VCA geschlossen → Verdrahtung
Verstimmt / schlechtes Tracking	Tempco fehlt → Paar nicht gekoppelt → Scale-Trim → passives CV-Splitten (1.3.2)
Läuft warm weg	Tempco/thermische Kopplung → Aufwärmzeit abwarten (4.1.4)
Klick bei Tönen	Control-Feedthrough → Attack zu steil → DC-Offset (4.3.5)
Brummen (50/60 Hz)	Masseschleife → Abblockung → Netzteil-Nähe → Schirmung (1.5)
Zirpen/digitales Geräusch	Digital-/Analogmasse nicht getrennt → Abblockung (7.5.2)
Rauschen	Gain-Struktur → hochohmige Knoten → OTA-Teiler (1.5.3)
Lange EG-Zeiten unerreichbar	Puffer-Bias-Strom → Elko statt Folie → Leckstrom (4.4.5)
S&H driftet	Puffer-Bias → Haltekondensator → Schalter-Reststrom (3.4.2)
VCA schließt nicht	Offset-Trim → CV erreicht 0 V nicht (4.3.7)
Filter oszilliert unkontrolliert	Resonanz-Rückkopplung → Phasenlage (4.2.7)

9.2.4 Ursachen-Häufigkeit (die realistische Erwartung)

In der Reihenfolge ihrer Wahrscheinlichkeit: **Lötfehler → falscher Bauteilwert bestückt → Bauteil verpolt/falsch orientiert → Verdrahtungsfehler → Schaltungsfehler → defektes Bauteil.** Das defekte Bauteil ist die *seltenste* Ursache — wer zuerst dort sucht, verliert Zeit.

9.3 Glossar (Kurzform, bilingual)

DE	EN	Kurzdefinition
Steuerspannung (CV)	control voltage	Spannung, die einen Parameter steuert (1.4)
1 Volt pro Oktave	1 volt per octave	Standard: +1 V → doppelte Frequenz (1.4.2)

DE	EN	Kurzdefinition
Gate	gate	Zustandssignal „Taste gedrückt” (4.4.1)
Trigger	trigger	kurzer Impuls beim Anschlag (4.4.1)
Hüllkurve	envelope	zeitlicher Verlauf einer Steuerspannung (4.4)
Transkonduktanz	transconductance	Strom-pro-Spannung, gm (2.3.4)
Selbstoszillation	self-oscillation	Filter schwingt bei hoher Resonanz (4.2.6)
Tempco	tempco	temperaturkompensierender Widerstand (3.3)
Matched Pair	matched pair	gepaarte Transistoren (2.2.2)
Slew	slew	Änderungsbegrenzung / Portamento (4.7.2e)
Aliasing	aliasing	Rückfaltung über Nyquist (7.3.3)
Nyquist-Frequenz	Nyquist frequency	halbe Abtastrate (7.3.2)
Attenuverter	attenuverter	Abschwächer mit Invertierung (4.7.2b)
Wavefolder	wavefolder	erzeugt Obertöne durch Falten (5.1.2)
Low-Pass Gate	low-pass gate	kombiniert VCA+Tiefpass (4.3.6)
HP	HP	Breiteneinheit, 5,08 mm (6.1.1)
Rail	rail	Versorgungsschiene, z. B. +12 V (6.1.2)

(Vollständiges Glossar im Anhang.)

9.4 Projekt-Register

Kuratierte Einstiegspunkte in die Open-Source-DIY-Landschaft (Details und Bewertung in Teil 6.4).

Für den ersten Nachbau: - MFOS „Noise Toaster” / Lehrprojekte — dokumentiert, einsteigergeeignet. - Lunetta-Schaltungen (CD40106) — hörbares Ergebnis mit minimalen Mitteln (2.3.2).

Für einzelne Module: - YuSynth — bewährte VCO/VCF/VCA/EG-Nachbauten. - Music Thing Modular — Utilities, Turing Machine. - Befaco — offene Bausätze.

Für hybride/digitale Module: - Mutable Instruments (Code offen) — als Studienobjekt für hybride Architektur. - Daisy/Teensy-Ökosystem — für eigene digitale Module (7.2).

Zum Ausprobieren ohne Hardware: - VCV Rack — Software-Modularsystem (7.6).

> **[zu verifizieren]** vor Veröffentlichung: sämtliche Projekt-Namen, Links, Verfügbarkeiten und Aktivitätsstatus gegen aktuelle Primärquellen (REGEL QUELLEN-SERIOSITÄT: keine Social-Media-Quellen, nur belastbare Projektseiten/Repositories).

9.5 Verknüpfung

- **Herleitung aller Schaltungen:** Teile 3 und 4.
- **Systematische Fehlersuche:** Teil 5.4.2. **Messtechnik:** Teil 2.5.
- **Formate und Landschaft:** Teil 6. **Eigene Entwicklung:** Teil 8.
- **Interaktive Rechner:** Tools T1–T7.
- **Anhänge:** A Formelsammlung, B Chip-Steckbriefe, C Eurorack-Spezifikation, D Werkzeug-/Software-Register.

Anhänge

> Referenzteil. Formeln, Chip-Steckbriefe, Formatdaten und Werkzeugregister zum schnellen Nachschlagen. Alle Werte sind Richt- und Orientierungsangaben; sicherheits- oder funktionskritische Zahlen sind vor der Verwendung gegen das jeweilige Datenblatt zu prüfen.

Anhang A — Formelsammlung

A.1 Grundgrößen (Teil 1)

Größe	Formel	Bemerkung
Frequenz/Periode	$f = 1/T$	Hz ↔ s
dB (Spannung)	$a = 20 \cdot \log_{10}(U_2/U_1)$	Feldgröße
dB (Leistung)	$a = 10 \cdot \log_{10}(P_2/P_1)$	
Spannungsteiler	$U_L = U_0 \cdot R_L/(R_i+R_L)$	Impedanzanpassung
Thermische Spannung	$U_T = kT/q \approx 25{,}85$ mV @ 300 K	Kern des Exp-Konverters

A.2 OpAmp-Grundschaltungen (Teil 3)

Schaltung	Formel
Nichtinvertierend	$V = 1 + R_f/R_1$
Invertierend	$V = -R_f/R_1$
Summierer	$U_{out} = -R_f \cdot \Sigma(U_i/R_i)$
Integrator	$U_{out}(t) = -(1/RC)\int U_{in}\,dt$
Hysterese (Schmitt)	$U_{Hyst} = U_{out,pp} \cdot R_1/(R_1+R_2)$

A.3 Oszillator und 1V/Oktave (Teil 4.1, 3.3)

Größe	Formel
1V/Okt-Kennlinie	$f = f_0 \cdot 2^{(U_{CV}/1V)}$
Shockley	$I_C = I_S \cdot e^{(U_{BE}/U_T)}$
mV pro Oktave	$U_T \cdot \ln 2 \approx 17{,}9$ mV
VCO-Frequenz	$f = I_C/(C \cdot \Delta U_{Schwelle})$
555 astabil	$f = 1{,}44/((R_1+2R_2)\cdot C)$
Schmitt-Osz. (40106)	$f \approx 1/(2{,}2 \cdot RC)$

A.4 Filter (Teil 4.2)

Größe	Formel
Grenzfrequenz (1 Pol)	$f_c = 1/(2\pi RC)$
Übertragung (1 Pol TP)	$H(f) = 1/(1 + j\,f/f_c)$
Güte/Dämpfung	$Q = 1/(2\zeta)$
Resonanzüberhöhung	$\approx 20 \cdot \log_{10}(Q)$ dB ($Q > 0{,}707$)
Flankensteilheit	n Pole → $n \cdot 6$ dB/Oktave

A.5 Hüllkurve und RC (Teil 4.4)

Größe	Formel
Zeitkonstante	$\tau = R \cdot C$
Aufladung	$U(t) = U_Z(1-e^{(-t/\tau)})$
Entladung	$U(t) = U_0 \cdot e^{(-t/\tau)}$
1τ / 3τ / 5τ	63,2 % / 95,0 % / 99,3 %

A.6 OTA, VCA, S&H (Teil 2.3.4, 3.4, 3.5)

Größe	Formel
Transkonduktanz	$g_m \approx I_{ABC}/(2\,U_T)$
OTA-Ausgangsstrom	$I_{out} = g_m \cdot U_{in}$
S&H-Droop	$dU/dt = I_{leck}/C$
LED-Vorwiderstand	$R = (U_V - U_{LED})/I_{LED}$

A.7 Digital (Teil 7)

Größe	Formel
Nyquist	$f_s > 2 \cdot f_{max}$
Aliasing	$f_{alias} =$
DAC-Auflösung	Schritt = Bereich/2^Bit
Cent pro Schritt	(Schritt[V]/1V)·1200
BBD-Verzögerung	$t_d = N/(2 f_{clk})$
Puffer-Latenz	t = Puffergröße/f_s
Biquad	$y[n]=b_0x[n] +b_1x[n-1]+b_2x[n-2]-a_1y[n-1]-a_2y[n-2]$

A.8 Eurorack-Strom (Teil 6.1)

Größe	Formel
Rail-Summe	$I_{ges,Rail} = \Sigma I_{i,Rail}$ (Rails getrennt)
Reserve	$I_{nutzbar} = I_{Netzteil} \cdot (1 - Reserve\%)$
HP-Breite	Breite[mm] = HP·5,08

Anhang B — Chip-Steckbriefe

[zu verifizieren] vor Veröffentlichung: aktuelle Verfügbarkeit, Nachbaubezeichnungen und Bezugsquellen jedes Chips gegen Datenblatt und Distributor.

B.1 Timer / Logik

Chip	Funktion	Kernwert	Hinweis
NE555 / TLC555	Timer astabil/monostabil	$f=1{,}44/((R_1+2R_2)C)$	CMOS-Variante (TLC/7555) störärmer
CD40106	6× Schmitt-Inverter	Hysterese intern	1 Osz. je Inverter, DIY-Liebling
CD4066	4× analoger Schalter	R_ON ~80–300 Ω	Reset/Routing/S&H
CD4046	PLL	R/C-VCO intern	Frequenzvervielfachung, Sync
CD4040/4024	Binärteiler	÷2^n	Oktavreihen, Top-Octave
CD4013	D-Flipflop		EG-Zustandslogik
CD4015/4006	Schieberegister		LFSR-Rauschen

B.2 Verstärker / OTA

Chip	Funktion	Kernwert	Hinweis
TL072 / TL074	Dual/Quad OpAmp, JFET	Slew 13 V/µs	DIY-Standard, gut für CV
LM13700	Dual OTA + Puffer	g_m=I_ABC/(2U_T)	Herz von VCA/VCF; Eingangsteiler zwingend
CA3080	Single OTA		Vorgänger; Nachbau AS3280/V3280
THAT2180 / V2164	Blackmer/Current-VCA	dB-linear	Studio/Poly, sehr sauber
AD633	4-Quadranten-Multiplizierer		Ringmodulator

B.3 Dedizierte Synth-ICs (Original → Nachbau)

Original	Funktion	Nachbau	Hinweis
CEM3340	VCO	AS3340 / V3340	Saw/Tri/Puls, Sync, interner Tempco
CEM3320	VCF	AS3320 / V3320	4-Pol, spannungssteuerbar
CEM3360 / SSM2164	Dual VCA	AS3360 / V3360	
CEM3310 / SSM2056	EG	AS3310 / V3310	spannungssteuerbare Zeiten
SSM2044	VCF 4-Pol LP	V2044	

B.4 BBD / Spezial

Chip	Funktion	Hinweis
MN3005/3007/3207	Eimerkette (BBD)	analoges Delay/Chorus; Nachbau V-Serie
MN3101	BBD-Takt	
NE570/571	Kompander	gegen BBD-Rauschen
THAT300/320	Transistorarray	Matched Pair für Exp-Konverter

B.5 Halbleiter-Standard

Bauteil	Einsatz
1N4148	Kleinsignal, Logik, Clipping
1N5817/5819	Schottky, Verpolungsschutz
BC547/BC557	NPN/PNP Universal
J201 / 2N5457	JFET, steuerbarer Widerstand

Bauteil	Einsatz
7812/7912, LM1117	Spannungsregler

Anhang C — Eurorack-Spezifikation kompakt

[zu verifizieren] gegen die Doepfer-A-100-Primärquelle.

C.1 Mechanik

Größe	Wert
Höhe (Panel)	128,5 mm (3 HE)
Breite	HP × 5,08 mm; Case-Reihe meist 84 oder 104 HP
Befestigung	M3, Ovallöcher
Tiefe	nicht genormt — vor Kauf prüfen

C.2 Stromversorgung (16-poliger Bus)

Schiene	Zweck
+12 V	analoge Positiv-Rail
–12 V	analoge Negativ-Rail (roter Streifen des Flachbandkabels!)
GND	Masse (mehrere Pins)
+5 V	Digital-Rail — **nicht immer vorhanden**
CV/Gate	optionaler Bus (kaum genutzt)

C.3 Signalpegel (Konvention, nicht genormt)

Signal	Bereich
Audio	±5 V (10 Vpp)
CV unipolar	0…+8 V (bis +10 V)
CV bipolar	–5…+5 V
Tonhöhe	1 V/Oktave
Gate/Trigger	0 V / +5 V (Schwelle ~1–2,5 V)
Ausgang R_i	~1 kΩ
Eingang R_in	~100 kΩ

Anhang D — Werkzeug- und Software-Register

[zu verifizieren] aktuelle Versionen, Lizenzen, Verfügbarkeit.

D.1 Simulation & EDA

Werkzeug	Zweck	Lizenz
Falstad Circuit Simulator	Lernen, Anschauung	frei, Browser
LTspice	SPICE, genau	frei (proprietär)
ngspice	SPICE, quelloffen	OSS
KiCad	Schaltplan+Layout+Fertigung	OSS
QSPICE	SPICE, neu	frei [z.v.]

D.2 Firmware & DSP

Werkzeug	Plattform
Arduino IDE / PlatformIO	AVR, RP2040, Teensy, Daisy, STM32
Pico SDK	RP2040 (C/C++, PIO)
Teensy Audio Library	Teensy
libDaisy + DaisySP	Daisy
STM32CubeIDE	STM32

D.3 Messtechnik (Anschaffungsreihenfolge)

1. Digitalmultimeter
2. Labornetzteil mit Strombegrenzung
3. Oszilloskop (≥ 2 Kanäle, 20–50 MHz)
4. Stimmgerät / Frequenzzähler
5. Funktionsgenerator, Kapazitätsmesser (nice-to-have)

D.4 Software-Modularsystem

Werkzeug	Zweck
VCV Rack	virtuelles Eurorack, Lernen & Entwurf (7.6)

D.5 Fertigung (Dienstleister)

[zu verifizieren] Preise, Lieferzeiten, Versand nach AT.

Dienstleister	Typ
JLCPCB, PCBWay	PCB (günstig, Asien)
Aisler, Eurocircuits	PCB (EU, schnell)
Thonk, Befaco, Modular Addict	Bausätze/Bauteile
Reichelt, Mouser, Digikey, TME	Bauteile allgemein

Verknüpfung

- Herleitung aller Formeln: Teile 1, 3, 4, 7. Chip-Kontext: Teil 2.3.
- Formatdetails: Teil 6.1. Werkzeugeinsatz: Teil 8.
- Interaktive Rechner zu den Formeln: Tools T2 (Filter), T3 (VCO), T4 (EG), T5 (Strom).