



OSZI WISSEN

XY-Betrieb am Oszilloskop

Bedienerhandbuch zum Simulator

Sechs Betriebsarten: Lissajous-Figuren, Phasenmessung, Vierpol, Kennlinienschreiber, Hystereseschleife und Trapezverfahren, dazu die Oszilloskop-Musik. Elf Kapitel, 21 Übungen und ein Prüfblatt.

Copyright 2026 by OsziWissen

Alle Rechte vorbehalten. Weitergabe und Vervielfältigung dieses Dokuments, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Urhebers.

Stand: September 2026 · Simulator Version 19

Inhalt

1. Aufteilung der Oberfläche	4
Die Anzeige-Einstellungen	5
Die untere Anzeige ist getriggert	6
Nur einen Teil der Bahn zeigen	6
2. Zwei Generatoren — Lissajous-Figuren	7
Die Ablesevorschrift	8
Die Falle beim Abzählen	9
Frequenzraster	9
Drei Fälle, drei Bilder	9
Verstimmung	10
3. Phasenmessung aus der Ellipse	10
4. Vierpol — der Phasengang	11
5. Kennlinienschreiber	12
Die Glühlampe	12
6. Hystereseschleife	13
7. Trapezverfahren	15
8. Oszilloskop-Musik	15
Datei laden	16
Kanalzuordnung	16
Die Ablenkung	17
Was der Schirm zeigt	17
Nachleuchten und Figurperiode	18
Abtastrate und Bahnschritt	19
Zeitfenster und Messwerte	19
Getriggert oder rollend	19
Spitzenwerte statt verdünnter Reihe	20
Wiedergabe und Ton	21
Die eingebauten Beispiele	21
Die Rosette mit Funktionsgeneratoren	22
9. Übungen	23
10. Grenzen des Modells	24
11. Kennzahlen zur Kontrolle	25

Im XY-Betrieb wird die Zeitablenkung abgeschaltet. Der eine Kanal steuert dann die waagerechte, der andere die senkrechte Ablenkung, und zu sehen ist nicht mehr der Verlauf über der Zeit, sondern die Bahn, die der Punkt in der Ebene beschreibt.

Das ist keine Spielerei. Vor der digitalen Messtechnik war der XY-Betrieb das Mittel, um Frequenzen zu vergleichen, Phasengänge abzulesen, Kennlinien aufzunehmen, Hystereseschleifen zu vermessen und den Modulationsgrad zu bestimmen — alles fünf mit demselben Gerät und ohne einen einzigen Zahlenwert ablesen zu müssen. Der Simulator bildet diese fünf Betriebsarten nach und stellt ihnen eine sechste zur Seite: die **Oszilloskop-Musik**, bei der die beiden Kanäle einer Stereodatei nichts anderes sind als die Bahn, die gezeichnet werden soll.

Alle Bilder in diesem Handbuch stammen aus dem Rechenkern des Simulators, es sind also echte Messbilder und keine Zeichnungen.

1. Aufteilung der Oberfläche

Aufteilung der Oberfläche

Gezeigt ist die Betriebsart »Zwei Generatoren«. Das Bedienfeld baut sich beim Umschalten neu auf.

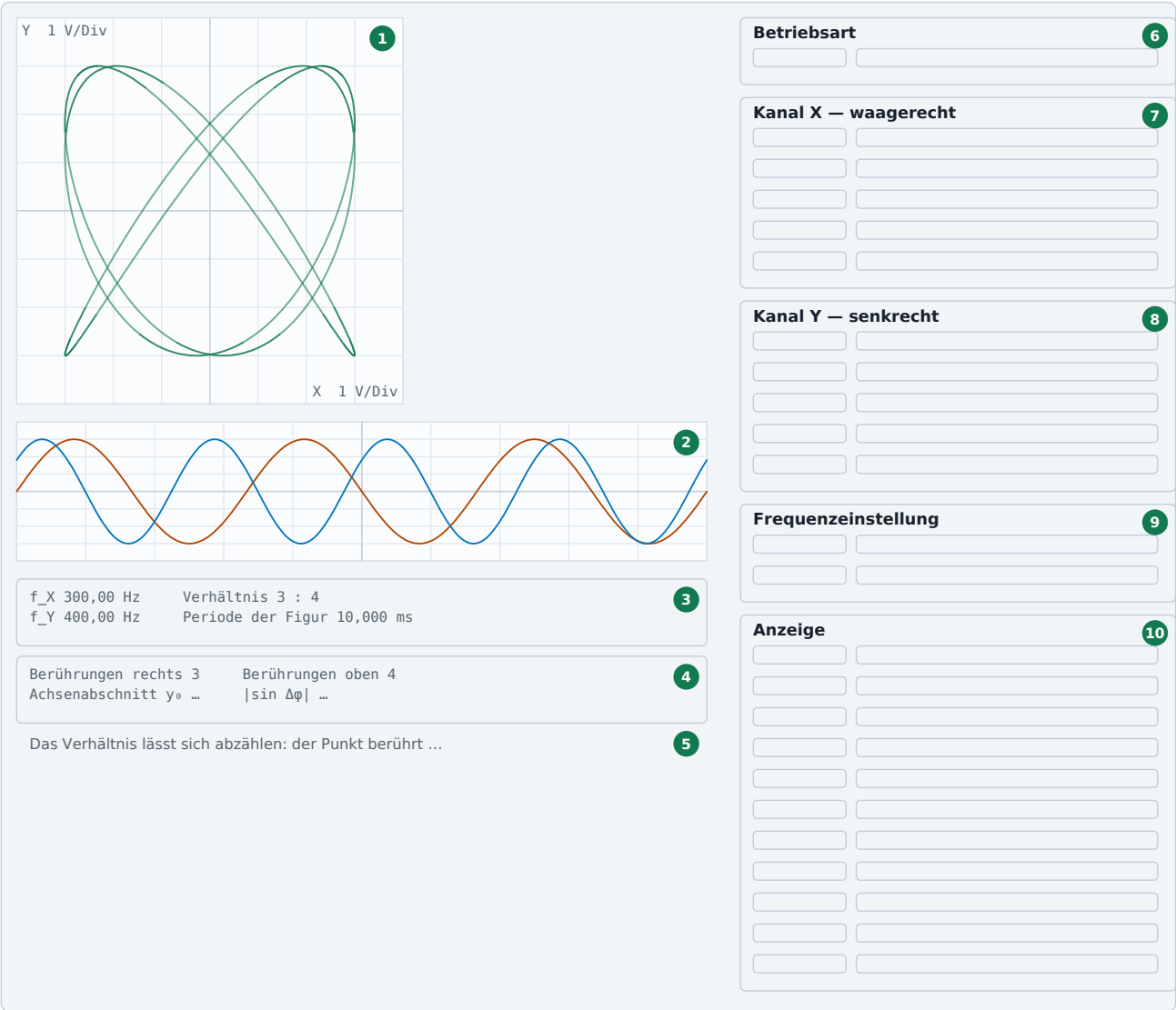


Bild 1.1 Aufteilung der Oberfläche

Nr.	Bereich	Inhalt
1	XY-Schirm	8 × 8 Rasterfelder, feine Teilung auf den Mittellinien
2	Zeitverläufe	beide Kanäle über der Zeit, 10 Felder breit
3	Messwerte	was die gewählte Betriebsart hergibt
4	Zusatzwerte	Phasenmessung, Wirbelstromanteil, Trapezablesung, Kennwerte des Zeitfensters
5	Hinweiszeile	erklärt die gerade eingestellte Lage
6	Betriebsart	Umschaltung zwischen den sechs Anzeigen

Nr.	Bereich	Inhalt
7	Kanal X	je nach Betriebsart Generator, Prüfspannung oder Ansteuerung
8	Kanal Y	je nach Betriebsart Generator, Netzwerk, Bauelement oder Kern
9	Frequenzeinstellung	nur bei zwei Generatoren
10	Anzeige	Ablenkung, Lage, Zeitbasis, Bahnausschnitt, Nachleuchten, Strichstärke, Zeitlauf, Farbschema

Das Bedienfeld baut sich beim Umschalten der Betriebsart neu auf; es zeigt immer nur, was gerade gilt. In der Betriebsart *Audiodatei* treten an die Stelle der Gruppen 7 bis 9 die Gruppen **Audiodatei**, **Wiedergabe** und **Kanalzuordnung**, und die Gruppe *Anzeige* wechselt teilweise ihren Inhalt — Einzelheiten in Abschnitt 8.

Die Anzeige-Einstellungen

Ablenkung X und Y. Die Ablenkung wird nicht absolut eingestellt, sondern als Stufe gegen einen selbsttätig ermittelten Wert. Der Grund: ein absoluter Schalter müsste je nach Betriebsart in Volt, Milliampere, Tesla oder Ampere je Meter beschriftet sein. Die Stufung in 1-2-5 bleibt dieselbe, und der sich ergebende Wert steht im Bild und in den Messwerten. Stufe *selbsttätig* passt die Figur auf etwa sechs Rasterfelder ein.

Lage X und Y verschiebt das Bild in Rasterfeldern, wie der Positionssteller am Gerät. »**Bild zentrieren**« setzt beide auf den Wert, der die Figur mittig stellt — bei unsymmetrischen Kurven wie einer Diodenkennlinie unentbehrlich.

Zeitbasis bestimmt, wie viel das untere Bild zeigt: von einem Zwanzigstel bis zu zwanzig Perioden des Bezugskanals. Bezug ist der langsamere der beiden Generatoren, sonst die Ansteuerfrequenz, beim Trapez die Modulationsfrequenz.

Die Bruchteile — $1/20$, $1/10$, $1/5$, $1/4$, $2/5$ und $1/2$ — sind überall dort nützlich, wo in eine Periode des Bezugs viele schnelle Schwingungen fallen. Beim Trapez etwa liegen zwanzig Trägerperioden in einer Modulationsperiode; mit $1/10$ sieht man davon zwei statt zwanzig und kann die Hüllkurve wirklich am einzelnen Trägerzug ablesen. Dasselbe gilt für die Hystereseschleife bei hoher Frequenz, wo der Wirbelstromanteil die Kurve verformt.

Die Zeitbasis wirkt **nur auf die untere Anzeige**. Der XY-Schirm hat keine Zeitachse, dort ändert sie nichts.

Nachleuchten in fünf Stufen von *aus* bis *sehr lang*. Die Spur liegt auf einer eigenen Ebene, die je Bild ein Stück weit gelöscht wird — das Raster bleibt davon unberührt. In den ersten fünf Betriebsarten wirkt die Einstellung nur bei laufender Zeit, denn ein stehendes Bild hat nichts, was ausbleichen könnte. Bei der Audiodatei wirkt sie immer und bestimmt dort unmittelbar, wieviel von der Bahn zu sehen ist.

Strichstärke dünn, mittel oder dick. **Schema** hell oder dunkel; für die Oszilloskop-Musik ist das dunkle Schema das naheliegende.

Zeitlauf *angehalten* friert die Zeit ein, *läuft* lässt sie weitergehen. Nur bei laufender Zeit sieht man eine nicht ganz eingerastete Figur wandern. Bei der Audiodatei entfällt der Schalter — dort läuft die Zeit ohnehin, sobald die Wiedergabe läuft.

Die untere Anzeige ist getriggert

Sie beginnt nicht dort, wo die Uhr gerade steht, sondern an der ersten **steigenden Flanke des X-Kanals** durch die Mitte zwischen Klein- und Großwert. Damit ein mehrwelliger Verlauf nicht auf einer Nebenflanke auslöst, muss das Signal vorher unter eine Schwelle 5 % darunter gefallen sein — die übliche Hysterese.

Ohne diese Ausrichtung begänne das Fenster einfach beim jeweiligen Stand der Uhr und rückte je Bild um 16,7 ms weiter. Bei 300 Hz und einer Periode Zeitbasis sind das **fünf volle Fensterlängen**: die Kurve zap-pelte nicht nur, sie schien durch Unterabtastung sogar rückwärts zu laufen — derselbe Effekt wie beim Wagenrad im Film.

Beide Kanäle bekommen denselben Zeitversatz, die Phasenlage zwischen ihnen bleibt also unangetastet. Läuft der Y-Kanal nicht im Gleichtakt mit X, steht die X-Kurve still und die Y-Kurve wandert im Takt der Schwebung durch. Das ist genau das Bild, das ein auf Kanal 1 getriggertes Oszilloskop zeigt — und bei 1000 gegen 1000,5 Hz wandert Y in einer Viertelsekunde um 45°.

Nur einen Teil der Bahn zeigen

Der XY-Schirm zeichnet sonst immer die vollständige Figur. Drei Regler erlauben, statt dessen nur einen Bogen davon zu zeigen — dann sieht man, **in welcher Reihenfolge** der Punkt die Figur abfährt.

Bahnanteil von 2 bis 100 Prozent legt fest, wieviel gezeichnet wird. **Bahnbeginn** von 0 bis 100 Prozent verschiebt den Bogen um die Figur. Am Ende des Bogens sitzt ein heller Punkt: dort steht der Strahl gerade.

Bahnlauf schiebt den Bogen von selbst weiter — wahlweise von Hand oder mit einem Umlauf in 2, 5 oder 15 Sekunden. Zusammen mit langem Nachleuchten ergibt das den Kometenschweif, den eine echte Röhre auch zeigt.

Dahinter steht mehr als eine Spielerei. Ein Digitaloszilloskop erzeugt sein XY-Bild nicht wie die Röhre aus einem laufenden Strahl, sondern rechnet es aus genau den Abtastwerten, die gerade im Yt-Fenster liegen. Zeigt die Zeitbasis weniger als eine volle Periode, ist deshalb auch die Figur unvollständig, und sie schließt sich erst, wenn das Fenster lang genug wird — ein Verhalten, das am analogen Gerät keine Entsprechung hat. Mit **Bahnanteil** und **Bahnbeginn** lässt sich genau das nachstellen, ohne an der Zeitbasis zu drehen.

Der Bahnausschnitt bildet zugleich eine Eigenheit heutiger Digitaloszilloskope nach. Ein Analoggerät lenkt den Strahl fortlaufend ab und zeichnet die Figur immer vollständig; ein DSO dagegen rechnet das XY-Bild aus den Abtastwerten der gerade erfassten Aufzeichnung, also aus genau dem Ausschnitt beider Signale, der im Yt-Betrieb im Fenster stünde. Bei kurzer Zeitbasis steckt darin nur ein Bruchteil der Figur, und statt der geschlossenen Kurve erscheint ein Bogen, der von Erfassung zu Erfassung springt.

Warum dafür ein eigener Antrieb nötig ist und nicht der Zeitlauf genügt, ist eine Frage der Abtastung: der Zeitlauf rückt je Bild um 16,7 ms weiter. Bei einer Figurperiode von 10 ms sind das 1,67 Perioden, der Bogenanfang springt also je Bild um 67 Prozent der Figur — scheinbar zufällig. Der Bahnlauf mit 5 Sekunden je Umlauf rückt dagegen um 0,33 Prozent je Bild weiter, und das ist eine gleitende Bewegung.

Zwei Dinge bleiben vom Bahnausschnitt unberührt. Die **Helligkeit** richtet sich weiterhin nach der Bahngeschwindigkeit der ganzen Figur, damit sich die Verteilung beim Durchschieben nicht ändert. Und die **Messwerte** gelten unverändert für die ganze Figur — Berührungen, Phase, Flächen. Der Bogen ist eine Frage der Anzeige, nicht der Messung.

Zur Helligkeit: Der Simulator zeichnet die Spur nicht gleichmäßig hell, sondern nach der Bahngeschwindigkeit. Eine echte Röhre leuchtet dort heller, wo der Punkt langsam läuft — deshalb sind Lissajous-Figuren an den Umkehrpunkten hell und in den schnellen Durchläufen blass. Gerechnet wird die Verweildauer je Wegstrecke.

2. Zwei Generatoren — Lissajous-Figuren

Beide Kanäle bekommen ein eigenes Signal. Stehen die Frequenzen in einem einfachen Verhältnis, entsteht eine geschlossene Figur.

Lissajous-Figuren — Frequenzverhältnis über der Phasenlage

Unter jedem Bild die gezählten Berührungen. Weichen sie vom Verhältnis ab, fallen zwei zusammen.

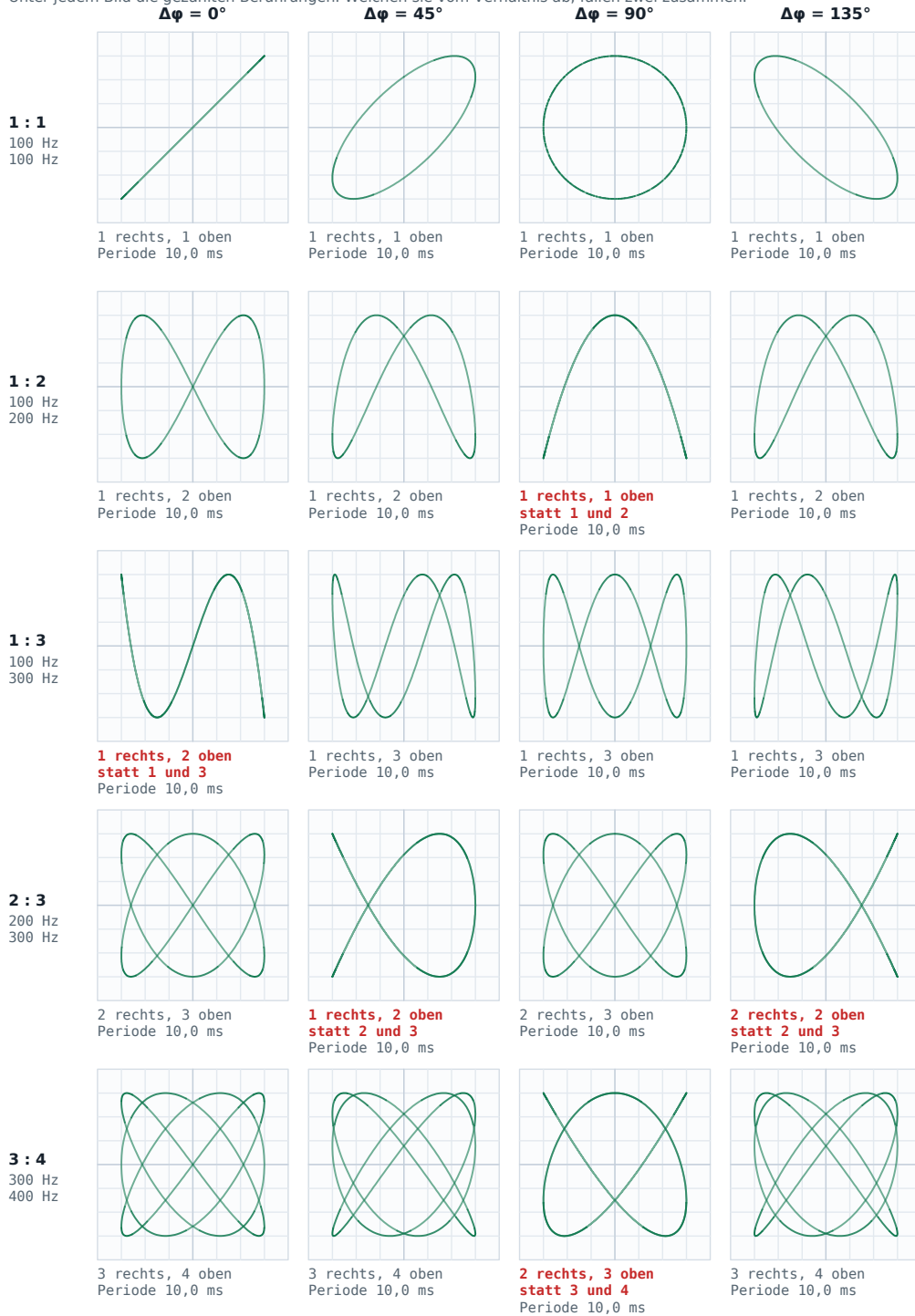


Bild 2.1 Lissajous-Figuren

Die Ablesevorschrift

Ist $n_x : n_y$ das gekürzte Frequenzverhältnis, dann durchläuft der X-Kanal in einer Figurperiode n_x volle Schwingungen und der Y-Kanal n_y . Der Punkt erreicht also den rechten Bildrand n_x mal und den oberen n_y mal:

$$\frac{f_X}{f_Y} = \frac{\text{Berührungen rechts}}{\text{Berührungen oben}}$$

Die Figurperiode beträgt

$$T = \frac{n_x}{f_X} = \frac{n_y}{f_Y}$$

Die Falle beim Abzählen

In der Tafel oben sieht man es in der Spalte für 90°: bei 1 : 2 zählt man oben nur **eine** Berührung statt zwei, bei 3 : 4 rechts **zwei** statt drei und oben **drei** statt vier. Dasselbe geschieht bei 1 : 3 und 0° sowie bei 2 : 3 und 45° und 135° — es hängt also an der Phasenlage und nicht am Verhältnis. Bei diesen Phasenlagen **fallen zwei Berührungspunkte zusammen**. Wer stur abzählt, bekommt ein falsches Verhältnis heraus — das ist die häufigste Fehlerquelle bei diesem Verfahren.

Der Simulator zählt deshalb nicht aus dem Verhältnis heraus, sondern bestimmt die Berührungspunkte wirklich und prüft sie auf Dopplungen. Weichen die Zahlen voneinander ab, sagt es die Hinweiszeile. Abhilfe: die Phase um wenige Grad verstellen, dann trennen sich die Punkte.

Frequenzraster

Ganzzahlige Verhältnisse (Werkseinstellung). Der Regler verstellt einen Kanal nicht in Hertz, sondern in ganzzahligen Verhältnissen zum jeweils anderen. Er läuft über 43 Stellungen mit allen gekürzten Brüchen bis 8, von 1 : 8 bis 8 : 1. Beim Ziehen landet man damit ausschließlich auf stehenden Figuren.

Daneben steht je Kanal ein Zahlenfeld. X ist dabei die Grundfrequenz: was man dort eintippt, wird genau übernommen, und Y folgt im bisherigen Verhältnis. Aus 300 : 500 Hz wird bei Eingabe von 440 Hz also 440 : 733,33 Hz — das Verhältnis 3 : 5 bleibt erhalten. Tippt man Y ein, rastet es auf das nächstgelegene Verhältnis zu X ein.

Freies Raster. Der Regler läuft logarithmisch über fünf Zehnerpotenzen von 1 Hz bis 100 kHz, mit 12000 Stufen also 0,096 % je Schritt — bis etwa 1 kHz Schritte von rund einem Hertz. Zusätzlich erscheint die Vorwahl **Frequenzverhältnis**, weil vier Drittel von 1000 Hz mit keinem Regler zu treffen sind: 1333,33 Hz ist nicht dasselbe wie 1333,3333 Hz.

Drei Fälle, drei Bilder

Der Simulator unterscheidet, was am Gerät wirklich zu sehen ist:

Fall	Bedingung	Bild	Anzeige
exakt	gekürzter Bruch ≤ 100	steht still	Periode der Figur
laufend	dicht an einem einfachen Bruch	dreht sich langsam	Umlaufdauer und Abweichung
dicht	auch die beste Näherung liegt weit daneben	füllt die Fläche	nicht ablesbar

Der mittlere Fall ist der wichtigste, denn er ist der eigentliche Zweck des Verfahrens: **die Umlaufdauer der Figur ist der Kehrwert der Frequenzabweichung**. Bei 1000 Hz gegen 1000,5 Hz dreht sich die Figur einmal je 2,000 s, und daraus liest man 0,500 Hz ab. Wer lange genug zählt, misst damit beliebig genau — deshalb wurde so früher der Netzfrequenznormal verglichen.

Zum Ansehen den Zeitlauf auf *läuft* stellen.

Verstimmung

Ein Zusatzfeld, das die Y-Frequenz um einen einstellbaren Betrag danebenlegt. Damit lässt sich der laufende Fall gezielt herstellen, ohne die Grundeinstellung zu verlieren.

3. Phasenmessung aus der Ellipse

Stehen beide Kanäle auf derselben Frequenz, entsteht eine Ellipse, und aus ihrem Achsenabschnitt folgt der Phasenunterschied unmittelbar.

Phasenmessung aus der Ellipse — beide Kanäle 100 Hz, gleiche Auslenkung

Der Achsenabschnitt y_0 ist der Wert von y beim Nulldurchgang von x . Aus ihm folgt $\sin \Delta\varphi = y_0/Y$ ohne kalibrierte Ablenkung.

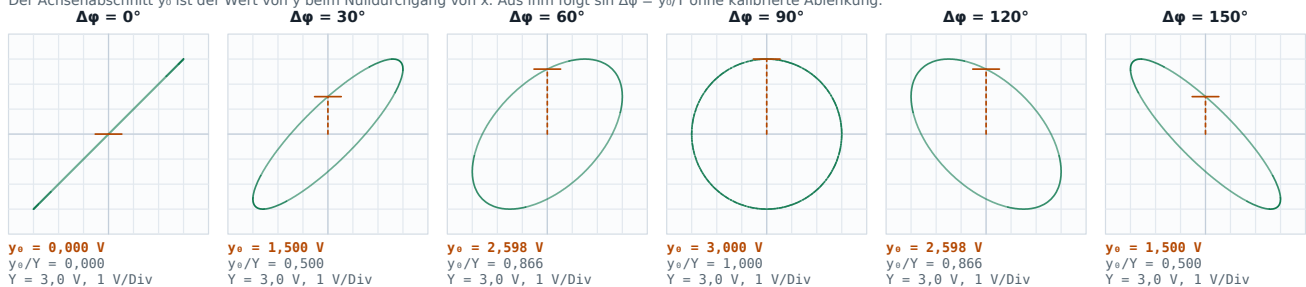


Bild 3.1 Phasenmessung aus der Ellipse

Beim Nulldurchgang von x gilt $2\pi ft + \varphi_x = 0$, also

$$y = Y \sin(\varphi_y - \varphi_x) = Y \sin \Delta\varphi \quad \implies \quad \sin \Delta\varphi = \frac{y_0}{Y}$$

Das Verfahren braucht **keine kalibrierte Ablenkung**, weil nur ein Verhältnis eingeht — man kann y_0 und Y in Rasterfeldern abzählen.

Zwei Dinge sind zu beachten:

- **Der Winkel bleibt zweideutig.** $\Delta\varphi$ und $180^\circ - \Delta\varphi$ ergeben denselben Achsenabschnitt. Unterschieden werden sie an der Neigungsrichtung der Ellipse: bis 90° kippt sie nach rechts, darüber nach links. Der Simulator gibt deshalb immer beide Winkel aus.
- **Bei 0° und 180° entartet die Ellipse zur Geraden.** Deren Neigung hängt dann nur noch von den Amplituden und Ablenkungen ab, nicht von der Phase.

Der Sonderfall gleicher Frequenz, 90° Phasenunterschied und gleicher Auslenkung in beiden Achsen ist der Kreis. Er prüft beide Bedingungen zugleich.

4. Vierpol — der Phasengang

X ist der Eingang, Y der Ausgang eines Netzwerks. Beim Durchfahren der Frequenz sieht man die Ellipse sich öffnen, kippen und wieder schließen.

Vierpol — Eingang waagrecht, Ausgang senkrecht

Eckfrequenz 1 kHz, Güte 5, Eingang 3 V. Ablenkung überall 1 V/Div, damit die Dämpfung unmittelbar sichtbar wird.

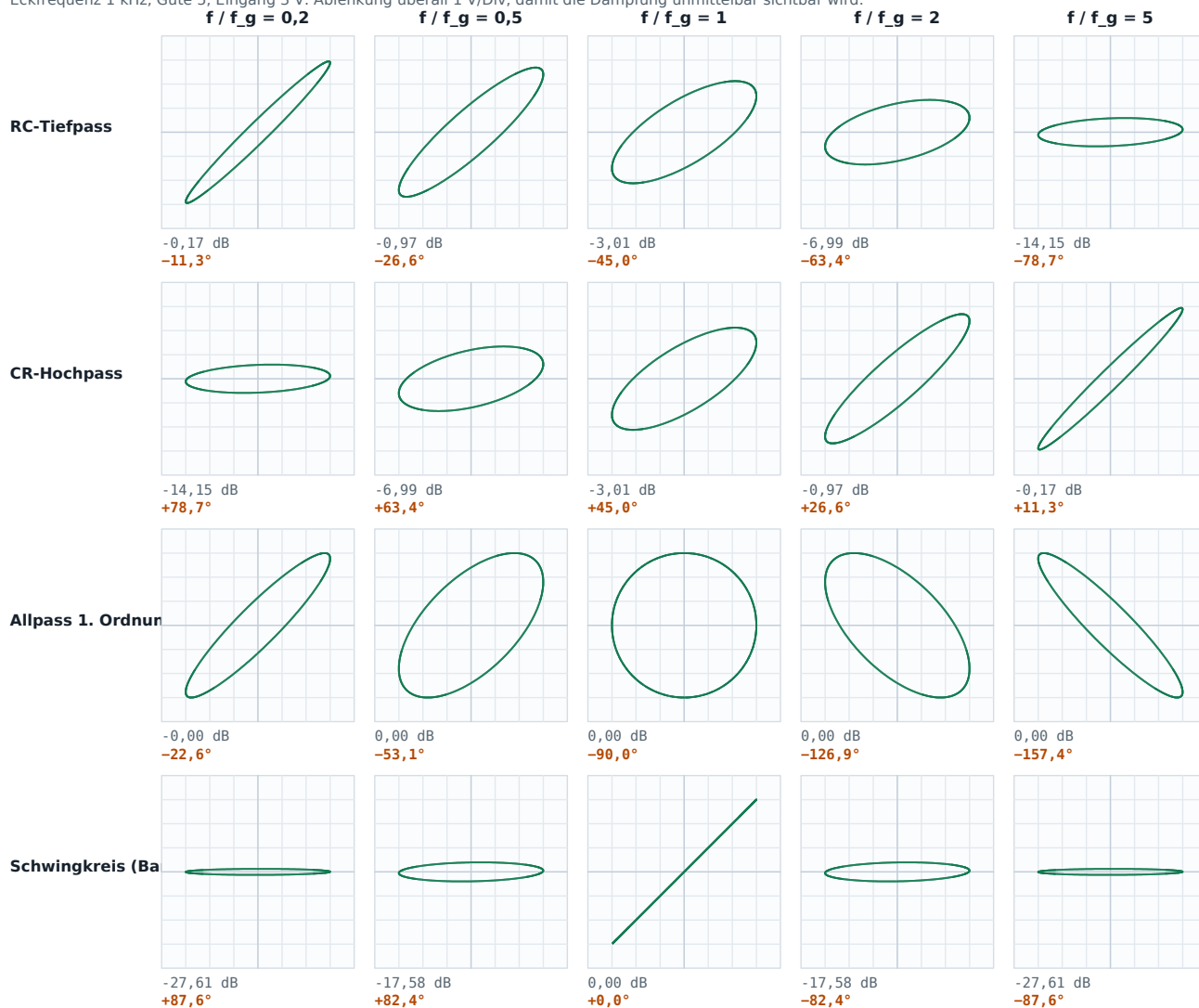


Bild 4.1 Vierpol über der Frequenz

Vier Netzwerke stehen zur Wahl. Bei der Eckfrequenz ergibt sich:

Netzwerk	Dämpfung	Phase
RC-Tiefpass	-3,01 dB	-45,00°
CR-Hochpass	-3,01 dB	+45,00°
Allpass 1. Ordnung	0,00 dB	-90,00°
Schwingkreis (Bandpass)	0,00 dB	0,00°

Der Allpass ist besonders lehrreich: die Dämpfung bleibt über den ganzen Frequenzbereich null, die Ellipse behält also ihre Höhe, und trotzdem dreht sich die Phase um volle 180°. Genau dafür baut man ihn.

Die Zusatzwerte zeigen die aus der Ellipse abgelesene Phase neben der gerechneten. Beide müssen übereinstimmen — das ist zugleich die Probe darauf, dass man das Verfahren aus Abschnitt 3 richtig verstanden hat.

Der Vierpol arbeitet nur mit Sinus. Bei anderen Signalformen wirkt das Netzwerk auf jede Oberschwingung anders, und eine einzelne Phasenverschiebung gibt es dann nicht mehr.

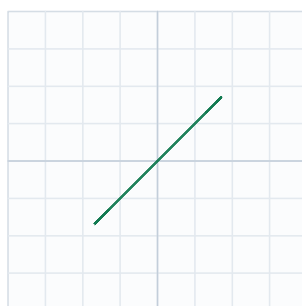
5. Kennlinienschreiber

Die Prüfspannung liegt über der Reihenschaltung aus Vorwiderstand und Bauelement. X ist die Spannung am Bauelement, Y der Strom — am Gerät über den Spannungsabfall am Vorwiderstand gemessen.

Kennlinienschreiber — Strom senkrecht über Spannung waagrecht

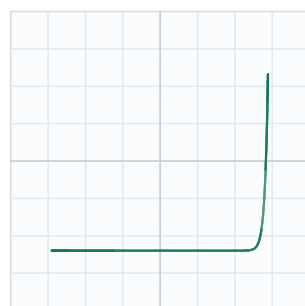
Prüfspannung sinusförmig. Jedes Bild mit eigener Ablenkung und Lage; ohne Lageverschiebung wäre vom Durchlassknick nichts zu sehen.

Widerstand 1 k Ω



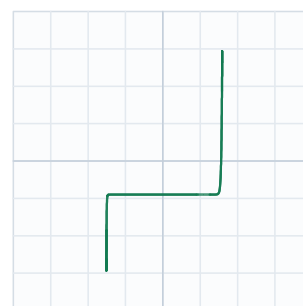
X 2,00 V/Div, Y 2,00 mA/Div
U -3,40 ... 3,40 V
I -3,4 ... 3,4 mA

Siliziumdiode



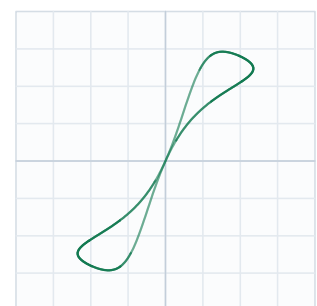
X 0,500 V/Div, Y 0,500 mA/Div
U -2,00 ... 0,89 V
I -0,0 ... 2,4 mA

Z-Diode 5,1 V



X 2,00 V/Div, Y 5,00 mA/Div
U -5,22 ... 0,98 V
I -10,2 ... 19,2 mA

Glühlampe



X 5,00 V/Div, Y 100 mA/Div
U -11,75 ... 11,75 V
I -292,4 ... 292,5 mA, 420 °C

Bild 5.1 Kennlinien von vier Bauelementen

Widerstand. Eine Gerade durch den Ursprung; ihre Steigung ist der Kehrwert des Widerstands. Alles Krumme ist Nichtlinearität.

Siliziumdiode. In Sperrrichtung liegt fast die ganze Prüfspannung an der Diode, in Durchlassrichtung nur die Flussspannung von etwa 0,7 V. Die Kennlinie ist damit stark unsymmetrisch — ohne Lageverschiebung wäre vom Durchlassknick nichts zu sehen. Genau deshalb hat jedes Oszilloskop Positionssteller.

Z-Diode. Zwei Knicke: in Durchlassrichtung bei 0,7 V, in Sperrrichtung bei der Z-Spannung. Die Steigung im Durchbruch ist der differenzielle Widerstand.

Die Glühlampe

Der interessanteste Fall, weil aus einer Kennlinie eine **Schleife** wird. Der Widerstand des Drahtes hängt von seiner Temperatur ab, und die folgt der Leistung nur mit der thermischen Zeitkonstante τ .

Glühlampe — aus der Kennlinie wird eine Schleife

12 V an 1 Ω Vorwiderstand, thermische Zeitkonstante 30 ms. Überall dieselbe Ablenkung: 5,00 V/Div waagrecht, 200 mA/Div senkrecht.

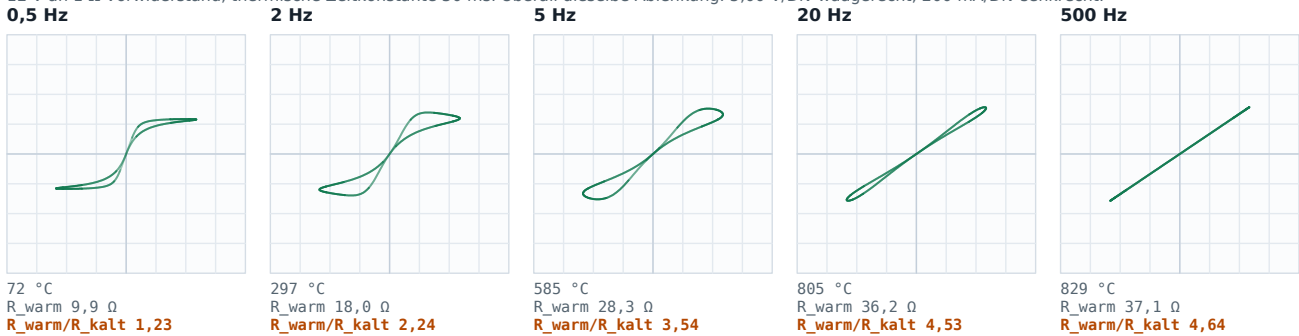


Bild 5.2 Glühlampe über der Frequenz

Frequenz	Drahttemperatur	Widerstand warm	Bild
0,5 Hz	72 °C	9,9 Ω	Schleife öffnet sich
2 Hz	297 °C	18,0 Ω	weit offen
5 Hz	585 °C	28,3 Ω	weit offen
20 Hz	805 °C	36,2 Ω	schließt sich wieder
500 Hz	829 °C	37,1 Ω	Gerade

Die Tafel gilt für **sinusförmige** Prüfspannung. Beim Umschalten auf die Betriebsart steht die Signalform auf Dreieck — das gibt bei den übrigen Bauelementen einen gleichmäßig durchlaufenen Kennlinienzug, heizt den Draht aber weniger auf, weil der Effektivwert kleiner ist: bei 500 Hz sind es dann 659 °C statt 829 °C.

Bei hoher Frequenz bleibt die Temperatur über die Periode praktisch stehen — der Draht ist dann ein gewöhnlicher Widerstand, und die Kennlinie ist eine Gerade mit dem **Warmwiderstand**. Bei sehr niedriger Frequenz folgt die Temperatur der Leistung, und man sieht die statische Kennlinie. Am weitesten offen ist die Schleife dazwischen, nämlich dort, wo die **doppelte** Signalfrequenz nahe bei $1/(2\pi\tau)$ liegt — die Leistung schwankt ja mit der doppelten Frequenz.

Das Verhältnis von Warm- zu Kaltwiderstand steht in den Messwerten. Mit den Werkseinstellungen — 12 V an 1 Ω Vorwiderstand bei 3 Hz — sind es 2,80; die Temperatur kommt dort über 420 °C nicht hinaus, weil die Schleife noch weit offen ist. Dreht man die Frequenz hoch, bis die Temperatur stehenbleibt, geht das Verhältnis gegen 4,64. Es hängt dann allein vom erreichten Temperaturhub ab: 0,0045 je Kelvin ist der Temperaturbeiwert von Wolfram, und 809 K Erwärmung ergeben eben $1 + 0,0045 \cdot 809 = 4,64$. Wird zusätzlich die Prüfspannung erhöht, bis der Draht seine Nenntemperatur von 2200 K über der Umgebung erreicht, geht das Verhältnis gegen 11 — und genau so groß ist dann der Einschaltstromstoß gegenüber dem Betriebsstrom.

6. Hystereseschleife

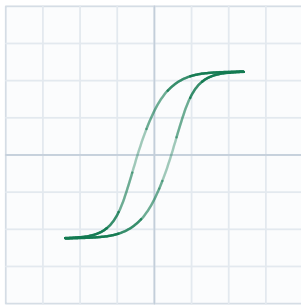
X ist proportional zur Feldstärke H, Y zur Flussdichte B. Die eingeschlossene Fläche ist die Ummagnetisierungsarbeit je Volumen und Umlauf:

$$w = \oint H dB \quad \text{und} \quad P = w \cdot f$$

Hystereseschleife — Flussdichte B senkrecht über Feldstärke H waagerecht

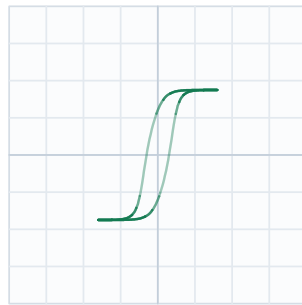
Oben vier Werkstoffe bei ihrer üblichen Betriebsfrequenz, jeder mit eigener Ablenkung.

Ferrit (MnZn)



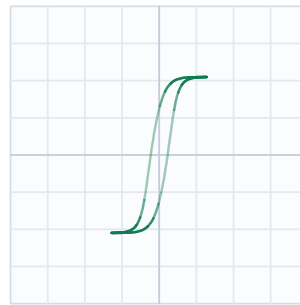
bei 100 kHz
 H_c 15 A/m, B_r 0,18 T
 36 J/m³ je Umlauf

Trafolech



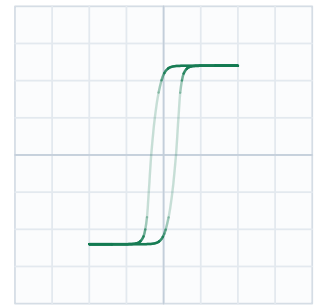
bei 50 Hz
 H_c 40 A/m, B_r 1,00 T
 377 J/m³ je Umlauf

Weicheisen



bei 50 Hz
 H_c 80 A/m, B_r 1,00 T
 859 J/m³ je Umlauf

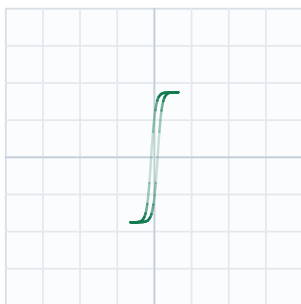
Hartmagnetisch



bei 50 Hz
 H_c 2500 A/m, B_r 1,05 T
 14804 J/m³ je Umlauf

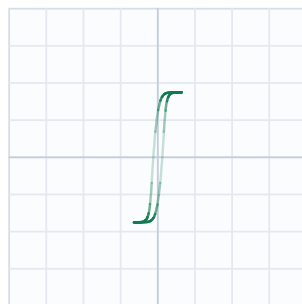
Unten Trafolech über der Frequenz: dieselbe Aussteuerung ± 320 A/m, dieselbe Ablenkung 500 A/m und 1,00 T je Rasterfeld.

10 Hz



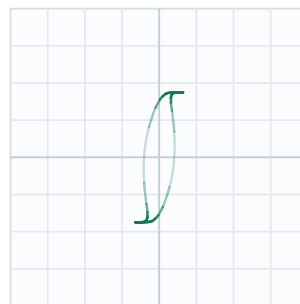
301 J/m³ je Umlauf
3,0 kW/m³
 Zusatzfeld 4 A/m

50 Hz



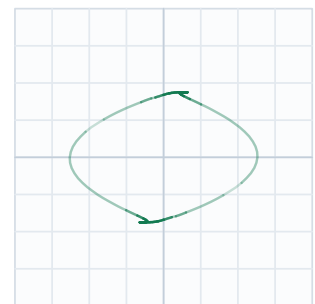
377 J/m³ je Umlauf
18,8 kW/m³
 Zusatzfeld 20 A/m

400 Hz



1038 J/m³ je Umlauf
415,1 kW/m³
 Zusatzfeld 163 A/m

3 kHz



5948 J/m³ je Umlauf
17843,0 kW/m³
 Zusatzfeld 1222 A/m

Bild 6.1 Hystereseschleifen

Vier Werkstoffe stehen zur Wahl, jeder mit seiner Sättigungsflussdichte, Koerzitivfeldstärke und einem Wirbelstrombeiwert. Die obere Bildreihe zeigt sie bei ihrer üblichen Betriebsfrequenz.

Die untere Reihe ist die eigentliche Aussage: **dieselbe Aussteuerung, dieselbe Ablenkung, nur die Frequenz ändert sich.**

Frequenz	Fläche je Umlauf	Verlustleistung	Wirbelstromfeld
10 Hz	301 J/m ³	3,0 kW/m ³	4 A/m
50 Hz	377 J/m ³	18,8 kW/m ³	20 A/m
400 Hz	1038 J/m ³	415 kW/m ³	163 A/m
3 kHz	5948 J/m ³	17843 kW/m ³	1222 A/m

Die Fläche wächst mit der Frequenz, die Verlustleistung also **stärker als linear**. Das ist der Wirbelstromanteil, und genau deshalb wird Blech geblecht und oberhalb einiger Kilohertz Ferrit verwendet — beim Ferrit bleibt die Fläche bis in den Kilohertzbereich konstant und wächst erst bei 100 kHz.

Zur Kontrolle: Trafolech bei 50 Hz und 1,75 T ergibt 2,46 W/kg, ein realistischer Wert für Elektrolech.

Der Regler **Wirbelstrom** skaliert den Beiwert zwischen 0 und 3. Auf null gestellt sieht man die reine Hystereseschleife ohne den frequenzabhängigen Anteil — der Unterschied ist der Wirbelstromverlust.

7. Trapezverfahren

X ist das modulierende Signal, Y das amplitudenmodulierte. Weil die Hüllkurve linear vom modulierenden Signal abhängt, entsteht ein Trapez, und aus seinen parallelen Seiten folgt der Modulationsgrad:

$$m = \frac{A - B}{A + B}$$

Trapez — AM-Signal senkrecht über dem modulierenden Signal waagerecht

Träger 20 kHz, Modulation 1 kHz, Trägeramplitude 2 V. Die parallelen Seiten A und B sind farbig hervorgehoben.

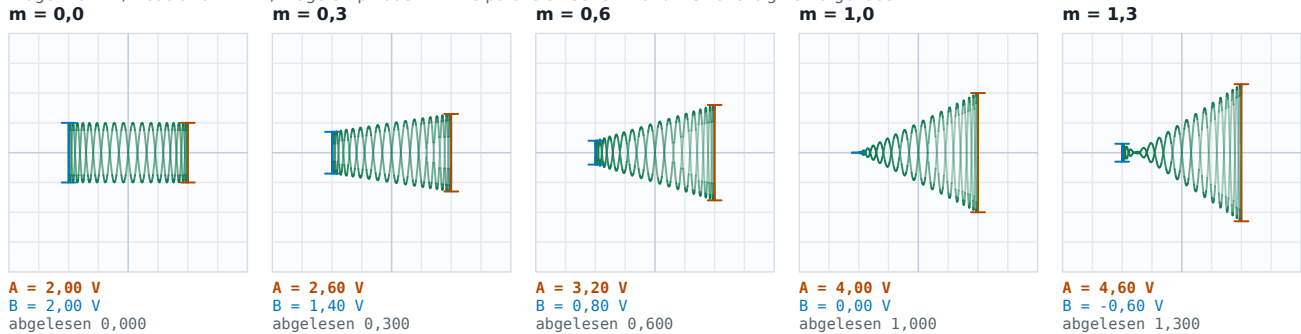


Bild 7.1 Trapezverfahren

eingestellt	Seite A	Seite B	abgelesen
0,0	2,00 V	2,00 V	0,000
0,3	2,60 V	1,40 V	0,300
0,6	3,20 V	0,80 V	0,600
1,0	4,00 V	0,00 V	1,000
1,3	4,60 V	-0,60 V	1,300

Bei $m = 0$ bleibt ein senkrechter Strich, bei $m = 1$ läuft das Trapez in eine Spitze. Darüber klappt es über — das ist die **Übermodulation**, und man erkennt sie im Trapez sofort, während sie im gewöhnlichen Zeitverlauf leicht zu übersehen ist.

Auch dieses Verfahren braucht keine kalibrierte Ablenkung, weil nur ein Verhältnis eingeht. Vor der digitalen Messtechnik war es deshalb das Mittel der Wahl.

8. Oszilloskop-Musik

Die sechste Betriebsart kehrt den Gedanken um. In den fünf ersten wird ein Signal an den XY-Eingang gelegt und man sieht, welche Figur dabei herauskommt. Hier wird die **Figur zuerst festgelegt** und daraus das Signal gerechnet: eine Bahn, die der Punkt abfahren soll, wird als Folge von Abtastwertpaaren in die beiden Kanäle einer Stereodatei geschrieben. Beim Abspielen im XY-Betrieb entsteht sie wieder.

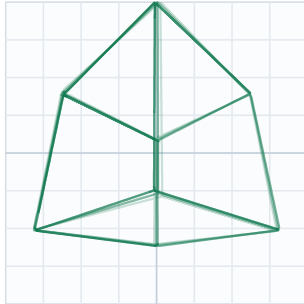
Genau davon lebt die sogenannte Oszilloskop-Musik. Werkzeuge wie *osci-render* und die Stücke von *oscilloscopemusic.com* erzeugen Dateien, deren Kanäle zugleich hörbare Klänge und sichtbare Figuren sind — bis hin zu zeichentrickartigen Bewegungen. Die Datei ist dabei nichts Besonderes: eine gewöhnliche Stereodatei, die jedes Abspielgerät wiedergeben kann.

Der Simulator lädt eine solche Datei, dekodiert sie im Browser und legt den linken Kanal auf die waagerechte, den rechten auf die senkrechte Ablenkung. Eine Tonausgabe ist möglich, aber nicht nötig — es geht um das Bild.

Eingebaute Beispiele — dieselbe Bahn, zu verschiedenen Zeitpunkten

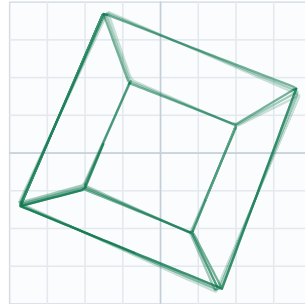
Nachleuchtdauer 30 ms (»kurz«), Abtastrate 48 kHz, Ablenkung selbsttätig

Würfel bei 1,0 s



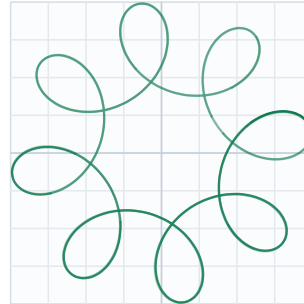
0,235 FS/Div
191,0 Div in 1584 Schritten

Würfel bei 3,4 s



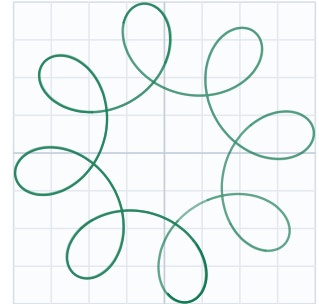
0,235 FS/Div
197,2 Div in 1584 Schritten

Rosette bei 1,0 s



0,213 FS/Div
134,1 Div in 1584 Schritten

Rosette bei 6,2 s



0,213 FS/Div
134,1 Div in 1584 Schritten

Bild 8.1 Die beiden eingebauten Beispiele

Datei laden

Über **Datei** lässt sich alles wählen, was der Browser dekodieren kann: wav, flac, mp3, ogg, m4a. Die Datei kann auch unmittelbar auf den Schirm gezogen werden; die Betriebsart stellt sich dann von selbst um. Verarbeitet wird alles im Browser, nichts wird irgendwohin übertragen.

Neben den beiden eingebauten Beispielen kann eine weitere Schaltfläche stehen, die ein Stück vom Webserver holt. Welche das sind, steht als Tafel am Anfang des Bedienteils; jeder Eintrag bekommt eine eigene Schaltfläche. Der Weg über den Server hat eine Einschränkung: beim Start über `file://` sperren die Browser das Nachladen, die Seite muss also wirklich von einem Webserver kommen. Der Simulator sagt es, wenn das nicht der Fall ist.

Zwei Punkte entscheiden über die Bildqualität, und beide haben mit dem Bild nichts zu tun:

Das Dateiformat. Verlustbehaftete Verfahren wie MP3 codieren die beiden Kanäle nicht unabhängig, sondern als Mitte-Seite-Paar, und werfen dabei genau das weg, was das Ohr nicht hört — die feinen Unterschiede zwischen links und rechts. Für das Ohr ist das richtig, für die Figur verheerend: sie franst aus und bekommt einen Schleier. Für ernsthafte Betrachtung gehört Oszilloskop-Musik in wav oder flac.

Die Abtastrate. Der Simulator legt das Audiosystem nach Möglichkeit auf 96 kHz, weil solche Stücke meist mit 96 oder 192 kHz erzeugt werden. Beim Dekodieren rechnet der Browser auf diese Rate um. Eine Datei mit 44,1 kHz wird dabei nur zwischengewertet, verliert also nichts; eine mit 192 kHz verliert die Hälfte ihrer Stützstellen. Welche Rate wirklich zustande kam, steht in den Messwerten.

Kanalzuordnung

Werkseinstellung ist **X = links**, **Y = rechts**; das ist die übliche Festlegung. Manche Stücke sind für ein Gerät mit umgekehrter Y-Richtung gerechnet, dann steht die Figur auf dem Kopf — dafür gibt es **X umpolen** und **Y umpolen**. Die Zuordnung selbst lässt sich ebenfalls tauschen.

Hat die Datei nur einen Kanal, bekommen beide Ablenkungen dasselbe Signal, und die Figur bleibt zwangsläufig eine Gerade unter 45°. Der Simulator meldet das.

Die Ablenkung

Anders als in den fünf übrigen Betriebsarten folgt die Ablenkung hier **nicht** der Reihe 1-2-5. Der Abtastwert einer Audiodatei ist keine Spannung, sondern eine Aussteuerung; die Einheit heißt deshalb **FS** für Vollaussteuerung, und der selbsttätige Wert ist einfach

$$\frac{\hat{u}_{\text{Datei}}}{4 \text{ Div}}$$

mit dem Scheitelwert über die **ganze** Datei, nicht über das gerade sichtbare Fenster. Ein voll ausgesteuertes Stück füllt den Schirm damit genau aus, und das Bild atmet nicht im Takt der Musik. Die Stufen der Ablenkre-gler wirken wie gewohnt darauf.

Was der Schirm zeigt

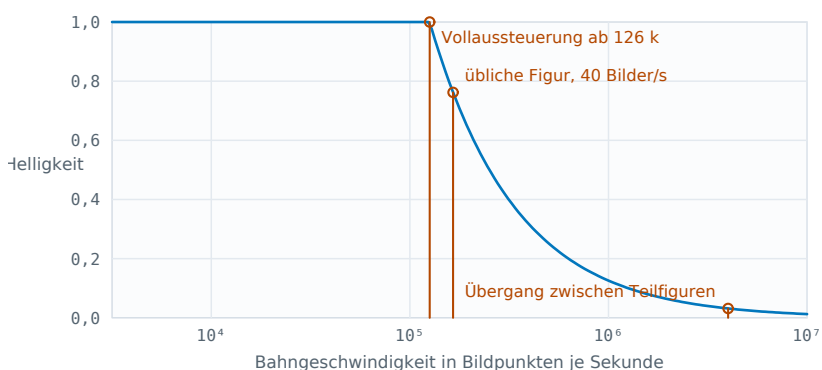
Gezeichnet wird nicht eine geschlossene Figur, sondern ein Fenster in die Vergangenheit: alle Abtastwerte der letzten Zehntelsekunden, jeder Bahnabschnitt mit seiner eigenen Helligkeit. Diese setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

$$b = I \cdot \underbrace{e^{-t_{\text{alt}}/\tau}}_{\text{Leuchtschicht}} \cdot \underbrace{\min\left(1, \frac{v_0 \Delta t}{\ell}\right)}_{\text{Verweildauer}} \quad v_0 = \frac{\text{Schirmhöhe}}{3,5 \text{ ms}}$$

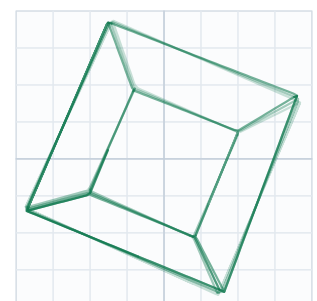
Δt ist die Dauer eines Abtastschritts, ℓ seine Länge auf dem Schirm und I der Regler **Intensität**, der zwischen 0,15 und 2 läuft. Der zweite Anteil sagt: ein Abtastschritt dauert immer gleich lang, also verteilt sich diese Zeit auf einen umso längeren Weg, je schneller der Punkt läuft.

Helligkeit über der Bahngeschwindigkeit

Ein Abtastschritt dauert immer 1/Abtastrate. Je schneller der Punkt läuft, desto länger wird der Weg, auf den sich diese Zeit verteilt.



am Bild



helle Kanten, blasser Rücksprünge
vier Kanten zweimal befahren

Bild 8.2 Helligkeit über der Bahngeschwindigkeit

Wichtig daran ist, dass der Ausdruck **von der Abtastrate unabhängig** ist: halbiert man sie, werden die Schritte doppelt so lang und dauern doppelt so lange, und b bleibt gleich. Dieselbe Bahn sieht also bei 48 und bei 192 kHz gleich hell aus — nur eckiger oder glatter.

Am Bild ergibt das den vertrauten Eindruck: die Umrissleuchten hell, die schnellen Übergänge zwischen Teilfiguren bleiben blass. Beim eingebauten Würfel sieht man beides zugleich, denn im Würfelgraph hat jede Ecke drei Kanten — ein Weg ohne Wiederholung ist unmöglich, vier Kanten werden zweimal befahren und leuchten deshalb heller.

Strahlprofil legt einen weichen Hof um die Spur, wie ihn eine echte Röhre hat. **Zwischenwerte** glättet die Bahn dort, wo die Schritte länger als zwei Bildpunkte sind: der Strahl läuft ja stetig und zieht zwischen zwei Abtastwerten keine Gerade. Bei kurzen Schritten wird nicht unterteilt, das wäre verschenkte Rechenzeit.

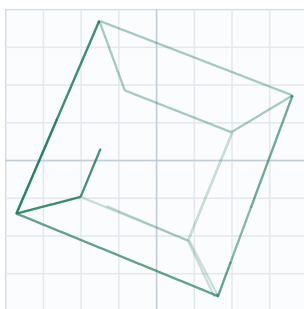
Nachleuchten und Figurperiode

Hier liegt die wichtigste Einstellung der ganzen Betriebsart. Sichtbar ist nur, was innerhalb des Nachleuchtfensters gezeichnet wurde; der Simulator zeichnet, was heller als $e^{-2,2}$ leuchtet, also $2,2\tau$ zurück. Ist dieses Fenster kürzer als eine Figurperiode, **zerfällt die Figur in Bruchstücke**.

Nachleuchtdauer — derselbe Augenblick, vier Einstellungen

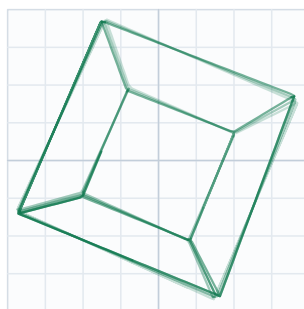
Würfel bei 3,4 s. Die Figur wird 42-mal je Sekunde durchlaufen, ihre Periode ist also 23,8 ms.

aus — $\tau = 10$ ms



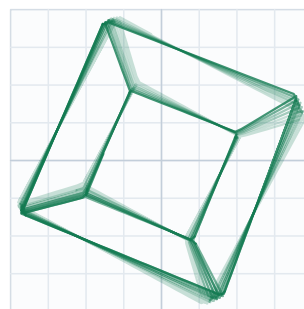
Fenster 22 ms
0,92 Figurdurchläufe

kurz — $\tau = 30$ ms



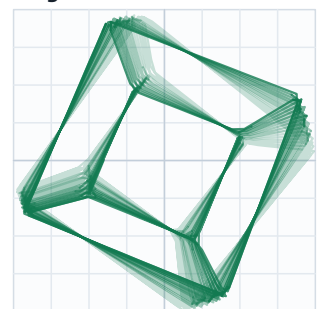
Fenster 66 ms
2,77 Figurdurchläufe

mittel — $\tau = 70$ ms



Fenster 154 ms
6,47 Figurdurchläufe

lang — $\tau = 160$ ms



Fenster 352 ms
14,78 Figurdurchläufe

Bild 8.3 Wirkung der Nachleuchtdauer

Stufe	τ	Fenster	Durchläufe einer Figur mit 42 Bildern/s
aus	10 ms	22 ms	0,92 — unvollständig
kurz	30 ms	66 ms	2,8
mittel	70 ms	154 ms	6,5
lang	160 ms	352 ms	14,8
sehr lang	300 ms	660 ms	27,7

Mittel ist die Werkseinstellung und trägt bis hinunter zu etwa sieben Figuren je Sekunde. Lange Nachleuchtdauern kosten Ruhe im Bild: eine Figur, die sich bewegt, zieht dann einen Schweif. Genau dafür hatten die Speicherröhren ihre langen Leuchtschichten — und genau deshalb wirkt Oszilloskop-Musik auf einem Gerät mit kurzem Nachleuchten fahrig.

Oberhalb von 48000 Abtastwerten je Bild wird die Bahn verdünnt, sonst käme der Bildlauf nicht mehr nach. Das trifft bei 96 kHz allein die Stufe *sehr lang* und steht dann in den Messwerten.

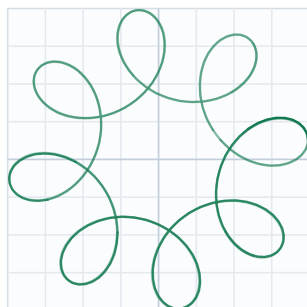
Abtastrate und Bahnschritt

Der Punkt springt je Abtastwert um eine feste Strecke weiter, und dazwischen zieht der Strahl eine Gerade. Diese Schrittweite in Rasterfeldern ist die eigentliche Kennzahl der Bildqualität; sie steht in den Zusatzwerten.

Abtastrate — je Abtastwert eine Gerade

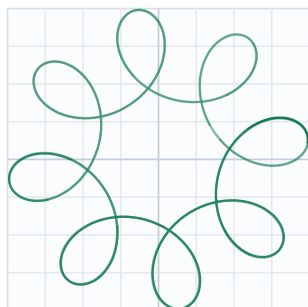
Rosette, 38 Figuren je Sekunde, Nachleuchten »kurz«. Die Bahn ist dieselbe; nur die Zahl der Stützstellen ändert sich.

8 kHz



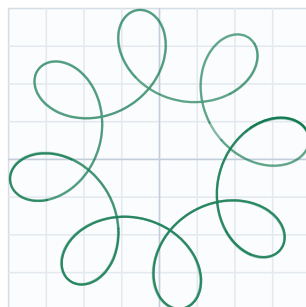
211 Werte je Figur
Schritt 0,253 Div
= 6,3 Bildpunkte

16 kHz



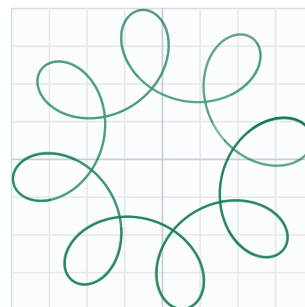
421 Werte je Figur
Schritt 0,127 Div
= 3,2 Bildpunkte

48 kHz



1263 Werte je Figur
Schritt 0,042 Div
= 1,1 Bildpunkte

96 kHz



2526 Werte je Figur
Schritt 0,021 Div
= 0,5 Bildpunkte

Bild 8.4 Wirkung der Abtastrate

Für eine Bahn der Länge L (in Div) bei f_{Fig} Figuren je Sekunde und der Abtastrate f_a ist sie

$$\Delta s = \frac{L \cdot f_{\text{Fig}}}{f_a}$$

Die eingebaute Rosette hat $L = 53,5$ Div und 38 Figuren je Sekunde: bei 48 kHz sind das 0,0424 Div je Schritt, bei 96 kHz 0,0212 Div. Bei 8 kHz wären es 0,254 Div, und die glatte Kurve wird zum sichtbaren Vi-eleck. Daran hängt auch die Wahl der Erzeuger: wer eine ruhige Figur mit viel Umriss will, braucht entweder eine hohe Abtastrate oder eine niedrige Bildrate — und die kollidiert mit dem Nachleuchten.

Zeitfenster und Messwerte

Zeitfenster von 2 ms bis 2 s legt fest, welchen Ausschnitt das untere Bild zeigt und über welchen Bereich die Zusatzwerte gebildet werden. Es hat mit dem Nachleuchtfenster nichts zu tun; beide sind unabhängig einstellbar. Ab Werk stehen 50 ms — bei einer Figur mit 40 Wiederholungen je Sekunde also zwei Durchläufe.

Getriggert oder rollend

Zeitanzeige hat zwei Stellungen. *Rollend* ist das, was ein Digitaloszilloskop bei sehr langsamer Zeitbasis tut: neue Abtastwerte treten rechts ein, das Bild wandert nach links. Bei voller Wiedergabegeschwindigkeit ist das unvermeidlich unruhig, denn der Vorschub je Bild liegt fest — 16,7 ms bei 60 Bildern je Sekunde:

Zeitfenster	Vorschub je Bild	Signalstelle durchquert den Schirm in
20 ms	83 %	1,2 Bildern

Zeitfenster	Vorschub je Bild	Signalstelle durchquert den Schirm in
50 ms	33 %	3 Bildern
500 ms	3,3 %	30 Bildern
2 s	0,8 %	120 Bildern

Langsamer wird es nur durch ein sehr breites Fenster — und dann sind die einzelnen Schwingungen nicht mehr zu erkennen. Oberhalb von etwa einem Drittel täuscht die Unterabtastung obendrein eine falsche Laufrichtung vor.

Deshalb steht die Anzeige ab Werk auf *getriggert*, und dann steht das Bild still. Ein einfacher Pegeltrigger genügt dafür allerdings nicht: er trifft eine glatte Kurve gut, versagt aber bei einer Figur wie dem Würfel, deren X-Verlauf die Mitte mehrmals je Umlauf kreuzt — der Trigger springt dann zwischen den Durchgängen hin und her. Ein Oszilloskop hat dagegen die Sperrzeit, und um die richtig zu setzen, muss man die Wiederholdauer kennen.

Also wird sie gemessen, zweistufig:

Stufe	Verfahren	Zweck
grob	Autokorrelation über 250 ms, auf 512 Werte gemittelt	Wiederholraten von 8 bis 200 Hz, rund 400 000 Rechenschritte, einmal je Sekunde
fein	Suche bei voller Abtastrate im Bereich $\pm 1,5$ %	die grobe Schätzung ist nur auf etwa 0,2 % genau — das ließe das Bild langsam wandern

Das Fenster beginnt dann auf einem Raster dieser Dauer. Für ein Signal, das sich mit ihr wiederholt, ist der gezeichnete Ausschnitt von Bild zu Bild derselbe. Gemessen an den eingebauten Beispielen wird der Bildunterschied damit um den Faktor 90 (Würfel) bis 700 (Rosette) kleiner; selbst mit 15 % zugemischtem Rauschen bleibt es beim Faktor 12 bis 16.

Die gefundene Rate steht als **Wiederholrate** in den Zusatzwerten — und das ist zugleich die Rate, mit der die Figur auf dem oberen Schirm neu gezeichnet wird. Bei den Beispielen kommen 41,99 und 38,00 Wiederholungen je Sekunde heraus; die eingebauten Werte sind 42 und 38. Findet sich kein Takt, etwa an einer leisen oder unregelmäßigen Stelle, rollt die Anzeige weiter und sagt es in der Hinweiszeile.

Spitzenwerte statt verdünnter Reihe

Bei 50 ms und 96 kHz fallen 4800 Abtastwerte auf rund 600 Bildspalten, also acht auf jede — bei breiterem Fenster entsprechend mehr. Wollte man daraus einen Linienzug ziehen, müsste man verdünnen — und **welche** Abtastwerte dabei überleben, wechselt mit jedem Bild. Die Anzeige flimmert dann, obwohl sich am Signal nichts geändert hat.

Deshalb wird wie bei jedem Oszilloskop und jedem Wellenformeditor **spitzenwertbezogen** gezeichnet: je Bildspalte ein senkrechter Strich vom kleinsten zum größten Abtastwert dieser Spalte. Der Strich ändert sich nur, wenn sich das Signal wirklich ändert. Gemessen an einem breitbandigen Stück bleibt so vom Bildunterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern nur noch ein Drittel bis ein Achtel übrig. Fällt weniger als ein Abtastwert auf die Bildspalte, wird wieder Punkt für Punkt gezeichnet; welches von beidem gilt, steht als **Zeitanzeige** in den Zusatzwerten.

Messwert	Aussage
Abtastrate	die nach dem Dekodieren wirklich vorliegende
Stelle, Dauer	Zeitzeiger und Länge der Datei
Scheitel-, Effektivwert	Aussteuerung je Kanal im Fenster
Gleichanteil	verschiebt die Figur; bei Oszilloskop-Musik oft gewollt
Korrelation r	± 1 heißt: beide Kanäle gleich, die Figur ist eine Gerade
Bahnlänge	Weg des Punktes im Fenster, in Div
Schrittweite	Bahnlänge je Abtastwert — die Kennzahl von oben
Bildrate	gemessen, mit der Zahl der Abtastwerte je Bild
Zeitanzeige	getriggert oder rollend, mit Vorschub je Bild
Wiederholrate	gemessener Takt, mit dem sich die Figur wiederholt
Bildspalte	Werte je Spalte, Spitzenwert- oder Abtastwertdarstellung

Die **Korrelation** ist der schnellste Test, ob eine Datei überhaupt als Oszilloskop-Musik taugt. Liegt sie dauerhaft nahe bei $+1$, ist das Stück faktisch mono, und man sieht nur eine Gerade — häufig die Folge einer Verarbeitungskette, die das Stereobild angetastet hat.

Ein Gleichanteil ist hier kein Fehler. Eine Wechsellspannungskopplung, wie sie am Oszilloskop üblich wäre, würde die Figur aus ihrer Lage reißen; deshalb arbeitet der Simulator ausschließlich gleichspannungsgekoppelt.

Wiedergabe und Ton

Geschwindigkeit von 0,02- bis 2-fach. Das ist mehr als eine Spielerei: bei einem Zwanzigstel der Geschwindigkeit lässt sich verfolgen, in welcher Reihenfolge der Punkt die Teilfiguren abfährt und wo die blassen Übergänge liegen. **Am Ende** entscheidet zwischen Anhalten und Wiederholen.

Tonausgabe ist abschaltbar und in der Werkseinstellung aus. Ist sie eingeschaltet, läuft die Bildzeit auf der Uhr des Audiosystems statt auf der des Bildschirms — Bild und Ton hängen dann an demselben Quarz und bleiben ohne jede Nachführung synchron. Unterhalb der 0,1-fachen Geschwindigkeit bleibt der Ton stumm; so tief herunter lässt sich ein Abspielvorgang nicht sinnvoll dehnen.

Die eingebauten Beispiele

Zwei Stücke sind fest eingebaut, damit die Betriebsart auch ohne eigene Datei etwas zeigt. Beide werden auf dieselbe Art erzeugt, wie es ein Werkzeug für Oszilloskop-Musik täte: eine Bahn wird entlang ihrer Bogenlänge gleichmäßig abgetastet, damit die Geschwindigkeit — und damit die Helligkeit — über die Figur konstant bleibt.

	Würfel	Rosette
Figuren je Sekunde	42	38
Bahnlänge je Figur	71,5 Div	53,5 Div
Scheitelwert	0,941 FS	0,852 FS
Ablenkung selbsttätig	0,2352 FS/Div	0,2130 FS/Div
Bahngeschwindigkeit	165 kpx/s	112 kpx/s
Helligkeit daraus	0,76	1,00

Der Unterschied ist beabsichtigt: der Würfel besteht aus geraden Kanten mit Rücksprüngen, die Rosette aus einer durchgehend glatten Kurve. Am Würfel sieht man die Wirkung der Abtastrate kaum — Geraden bleiben Geraden —, an der Rosette sofort.

Die Rosette mit Funktionsgeneratoren

Die Rosette ist die einzige der beiden Figuren, die sich mit gewöhnlichen Sinusquellen aufbauen lässt, und sie lohnt die Betrachtung, weil sie zeigt, wo die Lissajous-Figuren aufhören.

Fasst man die beiden Ablenkungen als komplexe Zahl $z = x + jy$ zusammen, so ist ein Sinuspaar mit 90° Versatz nichts anderes als ein **umlaufender Zeiger**. Die Zerlegung der Rosette ergibt genau zwei davon:

$$z(t) = 0,600 \cdot e^{j2\pi f_1 t} + 0,252 \cdot e^{-j2\pi f_2 t}, \quad f_1 = 38,031 \text{ Hz}, \quad f_2 = 266,024 \text{ Hz}$$

Das Minuszeichen im zweiten Term ist der ganze Trick: der zweite Zeiger läuft **andersherum** als der erste. Das Amplitudenverhältnis beträgt genau 0,420, das Frequenzverhältnis $-6,99493$. Die Zahl der Blätter ist der Abstand der beiden Ordnungen, $|1 - (-7)| = 8$.

Am Gerät braucht man dafür **vier Sinusausgänge**, also zwei zweikanalige Generatoren, und zwei Summierer:

Quelle	Frequenz	Amplitude	nach X	nach Y
Generator A, Kanal 1	38,031 Hz	1,00 V	0°	—
Generator A, Kanal 2	38,031 Hz	1,00 V	—	-90°
Generator B, Kanal 1	266,024 Hz	0,42 V	0°	—
Generator B, Kanal 2	266,024 Hz	0,42 V	—	$+90^\circ$

$X = A_1 + B_1$ und $Y = A_2 + B_2$, summiert über zwei gleiche Widerstände oder je einen Addierverstärker. Beide Generatoren brauchen intern gekoppelte Kanäle mit einstellbarem Phasenversatz; die beiden Generatoren untereinander dürfen gerade **nicht** gekoppelt sein.

Der einzige Unterschied zwischen den beiden Zeilenpaaren ist das **Vorzeichen der 90°** . Steht es bei beiden gleich, laufen beide Zeiger in dieselbe Richtung und man bekommt eine ganz andere Figur — eine Schleifenblume statt einer Rosette.

Wählt man $f_2 = 7f_1$ genau, so steht die Figur still. Jede Abweichung dreht sie starr, und zwar mit

$$\Omega = \frac{7f_1 - f_2}{8}$$

Mit den Werten oben sind das 0,0241 Umdrehungen je Sekunde, also eine volle Umdrehung in 41,5 s — genau das langsame Wandern, das im Simulator zu sehen ist. Für runde Zahlen im Labor: $f_1 = 40 \text{ Hz}$ und $f_2 = 279,8 \text{ Hz}$ ergeben eine Umdrehung in 40 s.

Mit nur zwei Sinuskanälen geht es nicht. Jeder Kanal führt dann genau eine Frequenz, und die Bahn ist damit zwangsläufig eine Lissajous-Figur. Für eine Rosette braucht jeder Kanal mindestens zwei Frequenzanteile. Zwei Auswege gibt es doch:

- **Arbiträrgenerator, zwei Kanäle.** Kanal 1 auf $\cos \theta + 0,42 \cos 7\theta$ und Kanal 2 auf $\sin \theta - 0,42 \sin 7\theta$ programmieren, je eine Periode über die Stützstellenzahl, beide auf 38 Hz und phasenstarr gekoppelt. Das

ergibt die stehende Rosette; das langsame Drehen fehlt, weil beide Kanäle zwangsläufig dieselbe Frequenz haben.

- **Zwei Generatoren ohne Summierer.** Statt zu addieren, den zweiten Generator als Amplitudenmodulation auf den ersten geben. Das ergibt eine echte Rosenkurve $r = \cos k\vartheta$ statt der Epitrochoide — verwandelt, aber nicht dieselbe Figur.

9. Übungen

1 — Verhältnisse abzählen. Frequenzraster auf ganzzahlige Verhältnisse, Phase Y auf 37° . Den Verhältnisregler durchfahren und bei jeder Stellung die Berührungen rechts und oben abzählen. Stimmt die Zählung mit dem angezeigten Verhältnis überein?

2 — Die Figur entstehen sehen. Verhältnis 3 : 4, Zeitlauf *angehalten*, Nachleuchten *lang*. Bahnanteil auf 15 %, Bahnlauf auf 5 Sekunden. In welcher Reihenfolge werden die Berührungspunkte rechts und oben angelaufen? Dann den Bahnanteil auf 100 % stellen — wo im fertigen Bild liegt der Anfang?

3 — Die Falle. Verhältnis 1 : 2 einstellen, Phase Y auf 90° . Wie viele Berührungen zählt man oben, und wie viele sollten es sein? Phase auf 80° verstellen — was geschieht?

4 — Frequenzvergleich. Freies Raster, beide Kanäle auf 1000 Hz, Verstimmung 0,5 Hz, Zeitlauf auf *läuft*. Die Figur dreht sich; wie lange braucht sie für einen Umlauf, und was folgt daraus? Verstimmung halbieren.

5 — Phase ablesen. Beide Kanäle 100 Hz, Phase Y auf 60° . Den Achsenabschnitt in Rasterfeldern abzählen und daraus $\sin \Delta\varphi$ bestimmen. Mit der Anzeige vergleichen. Dann auf 120° stellen — warum ändert sich der Achsenabschnitt nicht?

6 — Eckfrequenz finden. Betriebsart Vierpol, RC-Tiefpass. Die Frequenz so einstellen, dass die Phase -45° beträgt, und mit der eingestellten Eckfrequenz vergleichen. Dasselbe mit dem Allpass: dort sind es bei der Eckfrequenz -90° .

7 — Warum ein Allpass? Allpass wählen und die Frequenz über zwei Zehnerpotenzen durchfahren. Was tut die Ellipsenhöhe, was die Neigung?

8 — Dioden lesen. Siliziumdiode, Prüfspannung 2 V. Die Flussspannung beim Stromwert 2 mA ablesen. Dann den Vorwiderstand von $470\ \Omega$ auf $100\ \Omega$ verkleinern — wie ändert sich die Kurve, und warum?

9 — Einschaltstrom. Glühlampe bei 500 Hz. Das Verhältnis von Warm- zu Kaltwiderstand ablesen. Um welchen Faktor ist der Einschaltstrom größer als der Betriebsstrom?

10 — Die Schleife öffnen. Glühlampe, thermische Zeitkonstante 30 ms. Die Frequenz von 0,5 Hz bis 500 Hz durchfahren und die Stelle suchen, an der die Schleife am weitesten offen ist. Passt sie zu $2f \approx 1/(2\pi\tau)$? Dann die Zeitkonstante auf 3 ms stellen und die Suche wiederholen.

11 — Wirbelstrom trennen. Trafoblech, 400 Hz. Die Schleifenfläche mit und ohne Wirbelstrom vergleichen. Welcher Anteil der Verluste ist Hysterese, welcher Wirbelstrom?

12 — Warum Ferrit? Ferrit und Trafoblech nacheinander bei 50 Hz, 3 kHz und 100 kHz. Bei welcher Frequenz kehrt sich die Rangfolge um?

13 — Übermodulation erkennen. Trapez, Modulationsgrad von 0,8 auf 1,2 erhöhen. Ab wann klappt das Trapez über? Zum Vergleich das untere Bild ansehen — wie deutlich ist die Übermodulation dort zu sehen?

Dann die Zeitbasis auf 1/10 Periode stellen: jetzt sind statt zwanzig Trägerzügen nur zwei zu sehen, und die Hüllkurve lässt sich am einzelnen Zug ablesen.

14 — Die Figur zerlegen. Beispiel Würfel laden, Geschwindigkeit auf 0,05 stellen, Nachleuchten auf *kurz*. In welcher Reihenfolge fährt der Punkt die Kanten ab? Welche Kanten werden zweimal befahren, und woran erkennt man sie?

15 — Nachleuchten gegen Figurperiode. Denselben Würfel mit Nachleuchten *aus* ansehen. Warum ist die Figur unvollständig? Aus der Tafel in Abschnitt 8 die Figurrate bestimmen und nachrechnen, ab welcher Stufe sie vollständig wird.

16 — Die Schrittweite. Beispiel Rosette, Zeitfenster 20 ms. Bahnlänge und Schrittweite stehen nebeneinander in den Zusatzwerten; die eine ist die andere geteilt durch die Zahl der Schritte. Aus der Bahnlänge im Fenster die Bahnlänge **je Figur** bestimmen — bei 38 Figuren je Sekunde enthält ein 20-ms-Fenster 0,76 Figuren — und mit den 53,5 Div aus der Tafel vergleichen. Dann *Zwischenwerte* abschalten: was ändert sich am Bild, und warum bei der Rosette mehr als beim Würfel?

17 — Die Rosette nachbauen. Aus den Zusatzwerten die Wiederholrate der Rosette ablesen und mit den 38,031 Hz aus dem Abschnitt oben vergleichen. Warum weichen sie voneinander ab? Dann überlegen, welche vier Generatoreinstellungen nötig wären, um dieselbe Figur am Gerät zu erzeugen, und was sich ändert, wenn man bei Generator B den Phasenversatz von $+90^\circ$ auf -90° dreht.

18 — Die Laufrichtung. Die Zeitanzeige auf *rollend* stellen und ein Stück bei einfacher Geschwindigkeit mit dem Zeitfenster 500 ms ansehen: das Bild wandert nach links, neue Werte treten rechts ein. Dann schrittweise auf 20 ms herunterschalten. Ab welcher Stufe wird die Anzeige unruhig, ab welcher ist die Laufrichtung nicht mehr zu erkennen? Was sagt der Wert »Vorschub je Bild« dazu? Zum Schluss auf *getriggert* zurückstellen und sehen, was die Wiederholrate anzeigt.

19 — Korrelation lesen. Eine beliebige Stereodatei aus der Musiksammlung laden — kein Oszilloskop-Musikstück. Was zeigt die Korrelation, und wie sieht die Figur aus? Was sagt das über die Stereobreite der Aufnahme?

20 — Was MP3 anrichtet. Dasselbe Oszilloskop-Musikstück einmal als wav und einmal als mp3 laden. Woran erkennt man die verlustbehaftete Fassung am Bild, und warum trifft es gerade die Figur?

21 — Umpolen. Ein Stück laden und *Y umpolen* schalten. Warum bleiben Scheitel- und Effektivwerte gleich, während die Korrelation ihr Vorzeichen wechselt?

10. Grenzen des Modells

- **Der Schirm ist quadratisch mit 8×8 Rasterfeldern.** Echte Geräte haben 10×8 ; dort wird eine 1 : 1-Ellipse zur verzerrten Figur, solange man die Ablenkkoeffizienten nicht anpasst. Für das Lernen wäre das eine ständige Störung.
- **Die Hystereseschleife ist kein Jiles-Atherton.** Zugrunde liegt eine Reihe von Spiel-Gliedern mit gestuftem Spiel und dahinter eine sättigende Kennlinie — ein Prandtl-Ishlinskii-Ansatz. Er gibt Koerzitivfeldstärke, Remanenz und das Schließen kleiner Schleifen richtig wieder, ist aber keine Werkstoffrechnung.

- **Der Wirbelstrom sitzt im gemessenen H, nicht im Material.** An der Wicklung fließt neben dem Magnetisierungsstrom auch der Wirbelstromanteil, und die Stromzange sieht beide: $H_{\text{gemessen}} = H_{\text{Material}} + k \, dB/dt$. Das ist die messtechnisch übliche Aufteilung.
- **Der Durchbruch der Z-Diode ist empirisch nachgebildet** und nicht aus der Physik des Lawinen- oder Zener-Durchbruchs abgeleitet. Bei 10 mA liegt die Spannung rund 0,12 V über der Z-Spannung.
- **Oberhalb von 40 Berührungspunkten wird nicht mehr gezählt.** Abzählen könnte man sie am Bild ohnehin nicht.
- **Die Zählregel gilt nur für Sinus.** Andere Signalformen haben Plateaus statt einzelner Spitzen.
- **Kein Z-Eingang.** Aufwendige Oszilloskop-Musik nutzt am echten Gerät einen dritten Kanal zum Austasten des Strahls, damit die Übergänge zwischen Teilfiguren unsichtbar bleiben. Der Simulator zeichnet jeden Übergang; er bleibt nur blass, weil der Punkt dort schnell läuft.
- **Die Abtastrate ist die des Browsers, nicht die der Datei.** Beim Dekodieren wird auf die Rate des Audiosystems umgerechnet — angestrebt sind 96 kHz, aber nicht jedes Gerät gibt sie her. Eine Datei mit 192 kHz verliert dabei die Hälfte ihrer Stützstellen.
- **Die Taktmessung kann danebenliegen.** Sie sucht die stärkste Wiederholung zwischen 8 und 200 Hz. Ein Stück, dessen Figur langsamer wechselt oder das sich gar nicht regelmäßig wiederholt, lässt die Zeitanzeige rollen; ein Takt, der eine Oktave neben dem gemeinten liegt, lässt das Bild trotzdem stehen, zeigt aber die halbe oder doppelte Rate an.
- **Oberhalb von 48000 Abtastwerten je Bild wird die Bahn verdünnt.** Weil die Helligkeitsvorschrift von der Schrittdauer abhängt, bleibt das Bild dabei richtig; nur die Ecken werden geringfügig gröber.
- **Nicht nachgebildet:** Strahlstromdrift, Astigmatismus, Bandbreitengrenzen der Ablenkverstärker und die Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Kanälen. Gerade die letzte ist an echten Geräten der Grund, warum eine Phasenmessung oberhalb einiger Megahertz unbrauchbar wird — und bei Oszilloskop-Musik der Grund, warum schnelle Übergänge auf dem Schirm schief stehen und Ecken verschliffen erscheinen.

11. Kennzahlen zur Kontrolle

Prüfpunkt	Einstellung	Erwartung
Kreis	1 : 1, $\Delta\varphi = 90^\circ$, gleiche Auslenkung	Kreis, $y_0 = Y$
Gerade	1 : 1, $\Delta\varphi = 0^\circ$	Gerade, positive Steigung
Phasenmessung	1 : 1, $\Delta\varphi = 60^\circ$	$y_0/Y = 0,866$
RC-Tiefpass bei f_g	Vierpol	-3,01 dB, $-45,00^\circ$
Allpass bei f_g	Vierpol	0,00 dB, $-90,00^\circ$
Schwingkreis in Resonanz	Vierpol	0,00 dB, $0,00^\circ$
Frequenzabweichung	1000 gegen 1000,5 Hz	Umlaufdauer 2,000 s
Glühlampe	Werkseinstellung, 3 Hz	420 °C, 22,4 Ω, Verhältnis 2,80
Glühlampe	500 Hz	829 °C, 37,1 Ω, Verhältnis 4,64
Trafoblech	50 Hz, 1,75 T	377 J/m³, 2,46 W/kg
Trapez	m = 0,6	A = 3,20 V, B = 0,80 V, abgelesen 0,600
Beispiel Würfel	selbsttätige Ablenkung	0,2352 FS/Div, Scheitelwert 0,941 FS
Beispiel Rosette	selbsttätige Ablenkung	0,2130 FS/Div, Scheitelwert 0,852 FS
Beispiel Rosette	Schrittweite bei 48 / 96 kHz	0,0424 / 0,0212 Div
Mono-Datei	beliebige Stelle	Korrelation +1,000, Figur eine Gerade

Der Rechenkern trägt die Herleitungen als Kommentar im Quelltext. Wer eine Zahl nachvollziehen will, findet sie dort.