

wohltemperierte Halbtöne für den Drone-o-Tron (DOT) / well-tempered semitones for the Drone-o-Tron (DOT)

DE: Der Drone-o-Tron (DOT) verfügt über zwei Spielarten. Zum einen ist der Pitch im "Dronemode" (Drone I) stufenlos über ein Potentiometer einstellbar. So kann jede Frequenz des Drone-o-Tron getroffen werden. Im tonalen Modus (Drone O), soll der Drone-o-tron über eine Metallklaviatur auf der Platine direkt spielbar sein. Dies funktioniert über die VCO-Funktionalität des NE555. (VCO = Voltage Controllable Oscillator, also Frequenz/Tonhöhe steuerbar durch Spannung) Diese Steuerung soll ganz klassisch über das heute allgemein gültige wohltemperierte System laufen, sodass der Frequenzunterschied zwischen zwei Tasten einem Halbtonschritt entspricht. Dazu wurde für einen statischen Bereich des DOT die niedrigste mögliche Frequenz am Ausgang gemessen.

f_min (minimale Frequenz) wird erreicht bei U_CV = Versorgungsspannung = 3V. Da der Eingangsbuffer-OPV jedoch bei Spannungen so nah an der Spannungsversorgung nicht mehr linear verstärkt, wurde als höchste Spannung 2.858V (später erkennbar, warum) gewählt. Diese erzeugt am Ausgang eine Frequenz von 25.96Hz, was einem G# relativ zum Kammerton A=440Hz entspricht.

Ziel ist es jetzt zum einen den Tonumfang des DOT in einem statischen Bereich (nur durch Aussteuerung des NE555 als VCO) zu vermessen und einen Spannungsteiler für die Klaviatur zu berechnen, sodass die auf den Tasten erzeugten Spannungen, welche über ein Audiokabel beim Spielen an den NE555-VCO-Eingang gehen, auch wirklich Noten aus dem wohltemperierten System mit seinen Halbtonschritten erzeugen.

Dazu wurden nun die Frequenzen für den Tonumfang von knapp zwei Oktaven über G# (25.96Hz) berechnet. Anschließend wurden die am VCO-Eingang des NE555 benötigten Spannungen gemessen, um diese berechneten Frequenzen zu erhalten. Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle erkennbar.

EN: The Drone-o-Tron (DOT) has two modes of play. On one hand, the pitch in "Dronemode" (Drone I) is continuously adjustable via a potentiometer. So every frequency of the Drone-o-Tron can be hit. In tonal mode (Drone O), the Drone-o-tron is supposed to be directly playable via a metal keyboard on the circuit board. This works via the VCO functionality of the NE555. (VCO = Voltage Controllable Oscillator, i.e. frequency/pitch controllable by voltage) This control is supposed to run in a whole classical way via the today generally valid well-tempered system, so that the frequency difference between two keys corresponds to a semitone step. For this purpose, the lowest possible frequency at the output was measured for a static range of the DOT.

f_min (minimum frequency) is reached at U_CV = supply voltage = 3V. However, since the input buffer OPV no longer amplifies linearly at voltages this close to the power supply, 2.858V was chosen as the highest voltage (we will see why later). This produces a frequency of 25.96Hz at the output, which corresponds to a G# relative to the concert pitch A=440Hz. The goal now is to measure the range of the DOT in a static range (only by using the NE555 as VCO) and to calculate a voltage divider for the keyboard, so that the voltages generated on the keys, which goes to the NE555 VCO input via an audio cable when playing, really generates notes from the well-tempered system with its semitone steps.

For this purpose, the frequencies for the range of just under two octaves above G# (25.96Hz) were calculated. Then the voltages required at the VCO input of the NE555 were measured to obtain these calculated frequencies. The result can be seen in the following table.

U_CV [V]	f_soll [Hz]	Ton
2.914	23.12465143	F#
2.878	24.49971476	G
2.858	25.95654361	G#
2.848	27.50000001	A
2.834	29.1352351	A#
2.817	30.86770634	B
2.798	32.70319567	C
2.775	34.64782888	C#
2.749	36.708096	D
2.719	38.89087298	D#
2.686	41.20344463	E
2.647	43.65352894	F
2.603	46.24930285	F#
2.551	48.99942951	G
2.494	51.91308721	G#
2.423	55.00000002	A
2.347	58.27047021	A#
2.257	61.73541268	B
2.155	65.40639135	C
2.032	69.29565777	C#
1.889	73.416192	D
1.7066	77.78174596	D#
1.4499	82.40688926	E
	87.30705789	F
	92.49860571	F#

nicht linear/non linear (OPV clipppt, opam is clipping)
nicht linear

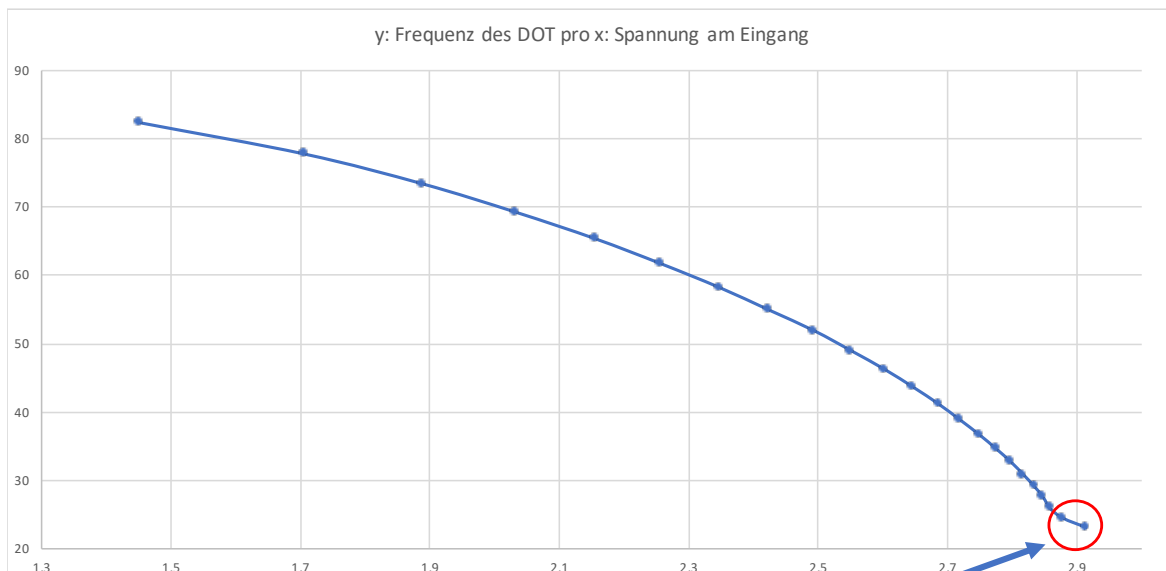
Faktor: 1.05946309

Kammerton A	440Hz
A	220Hz
A	110Hz
A	55Hz
A	27.5Hz
G#	25.9565436
G	24.4997148

DE: Heute ist das zwölfstufig gleichschwebende („wohltemperierte“) System allgemein üblich, bei der alle Halbtonschritte eine feste Proportion von 1:1,059463094359 haben.

EN: Today, the twelve-step equal temperament ("well-tempered") system is generally used, in which all semitone steps have a fixed proportion of 1:1.059463094359.

<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/musik/artikel/intervalle>



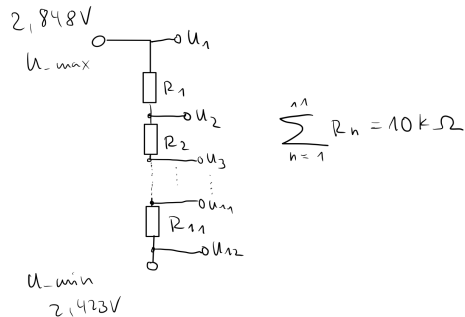
DE: nicht linearer Bereich des OPV
(Abfall nicht mehr exponentiell)
ENG: non linear region of opamp
(decrease isn't exponential anymore)

DE: Aus den Messwerten sind nun drei Informationen abzuleiten. Zum einen hat der NE555 ein exponentielles Verhalten zwischen Eingangsspannung und Ausgangsfrequenz. Dementsprechend wird ein exponentieller Spannungsteiler benötigt, d.h. die Widerstände besitzen alle einen unterschiedlichen Wert. Davon ausgehend ist nun die zweite wichtige Sache zu erkennen. Bei den Spannungen über 2.9V mischt sich in die NE555-Kurve die Nichtlinearität der verwendeten OPVs ein. Diese kommen zwar bis nahezu an ihre Versorgungsrail, (3V) jedoch ist das Verhalten nicht mehr linear und daher nicht für die Berechnung des Spannungsteilers zu gebrauchen. Daher werden diese beiden Werte verworfen. Die dritte erkennbare Information ist, dass der NE555 im statischen VCO-Modus keine zwei Oktaven Frequenzbereich hat. Die niedrigste Frequenz wird bei $U_{in} = 3V$, die höchste bei $U_{in} = 1.1V$ erreicht. Das hat etwas mit dem inneren Aufbau des Präzisionsschmitttrigger-ICs zu tun und kann extern nicht geändert werden. Bei $U_{in} = 1.1V$ kommt der NE555 jedoch nicht mehr an die Note F (siehe Tabelle oben) heran, sodass für die zweite volle Oktave leider drei Halbtöne fehlen. Das ist aber kein Problem für die Spielweise, so wird der DOT nur eine einzige Oktave auf der Klaviatur haben.

EN: Three pieces of information can now be derived from the measured values. First, the NE555 has an exponential behavior between input voltage and output frequency. Accordingly, an exponential voltage divider is required, i.e. the resistors all have a different value. Starting from this now the second important thing to recognize: At voltages above 2.9V the nonlinearity of the used OPamps mixes into the NE555 curve. These reach almost their supply rail (3V), but the behavior is no longer linear and therefore not to be used for the calculation of the voltage divider. Therefore these two values are discarded. The third recognizable information is that the NE555 in static VCO mode does not have two octaves of frequency range. The lowest frequency is set at $U_{in} = 3V$, the highest at $U_{in} = 1.1V$. This has something to do with the internal design of the precision Schmitt trigger IC and cannot be changed externally. At $U_{in} = 1.1V$, however, the NE555 no longer approaches the note F (see table above), so unfortunately three semitones are missing for the second full octave. But this is not a problem for playing, so the DOT will have only one octave on the keyboard.

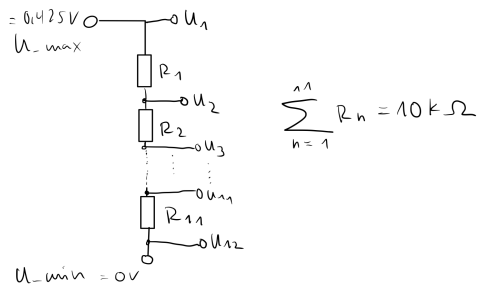
DE: Mit den nun gesammelten Informationen und Messwerten soll nun ein Spannungsteiler berechnet werden, welcher zwölf Kontrollspannungen ausgibt, (12 Noten = 1 Oktave) für die zwölf Noten einer Oktave. Dazu wird von den obigen Messwerten ein Oktavsprung von A zu genommen, da dieser eine runde Anfangs- und Endfrequenz hat und im linearen Bereich des OPV liegt. Als Gesamtwiderstand des Spannungsteilers werden 10kΩ festgelegt.

EN: With the now collected information and measured values a voltage divider is to be calculated, which outputs are twelve control voltages, (12 notes = 1 octave) for the twelve notes of an octave. For this purpose, an octave step of A is taken from the above measured values, since this has a round start and end frequency and lies in the linear range of the Opamp. The total resistance of the voltage divider is set to 10kΩ.



DE: Zur leichteren Berechnung und da auf der Platine U_{min} und U_{max} frei einstellbar sind, ziehen wir den Offset von 2.423 V von U_{min} und U_{max} ab.

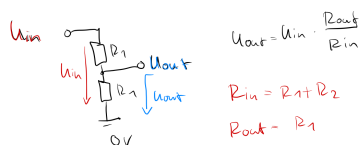
EN: For easier calculation and because U_{min} and U_{max} are freely adjustable on the board, we subtract the offset of 2.423 V from U_{min} and U_{max} .



DE: Nun beginnen wir von oben nach unten für alle Ausgangsspannungen U_1 bis U_{12} den Ausgangswiderstand zu berechnen. Aus der Differenz zum konstanten Eingangswiderstand von 10kΩ erhalten wir die Ausgangswiderstände. Durch eine anschließende Iteration der Messwert von unten nach oben und die Subtraktion vom vorherigen Ausgangswiderstand erhalten so die Widerstände R_1 bis R_{11} . Die entsprechende Berechnung ist in der folgenden Tabelle erkennbar.

EN: Now we start to calculate the output resistance from top to bottom for all output voltages U_1 to U_{12} . From the difference to the constant input resistance of 10kΩ we get the output resistances. By a subsequent iteration of the measured value from bottom to top and the subtraction from the previous output resistance we get the resistances R_1 to R_{11} . The corresponding calculation can be seen in the following table.

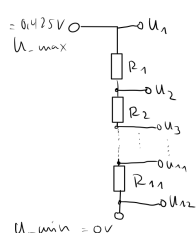
Spannungsteiler allg. / voltage divider in general



$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_{out}}{R_{in}}$$

$$R_{in} = R_1 + R_2$$

$$R_{out} = R_1$$



Bsp.: $U_2 = U_{max} \cdot \frac{R_{out}}{R_{in} = 10k\Omega}$

$$0,425V = 0,425V \cdot \frac{R_{out}}{10k\Omega}$$

$$\Rightarrow R_{out} = \frac{0,425V \cdot 10k\Omega}{0,425V}$$

$$\approx 9,67k\Omega$$

U_min - offset (im Spannungsteiler)	f. Halbtonschritte: U_gesucht	U_aus rel. zu offset	Span.Bereich U_ein	theor. R_ein [kΩ]	theor. R_aus	Diff. zum Vorwiderst.[kΩ]	Diff. zum Vorwiderst.[Ω] ger.	nächster widerstand aus E96 Reihe	widerstand aus
2.423	2.848	0.425	0.425	10	10	0.329411765	329	330	
2.423	2.834	0.411	0.425	10	9.670588235	0.4	400	402	
2.423	2.817	0.394	0.425	10	9.270588235	0.447058824	447	442	
2.423	2.798	0.375	0.425	10	8.823529412	0.541176471	541	536	
2.423	2.775	0.352	0.425	10	8.282352941	0.611764706	612	619	
2.423	2.749	0.326	0.425	10	7.670588235	0.705882353	706	698	
2.423	2.719	0.296	0.425	10	6.964705882	0.776470588	776	787	
2.423	2.686	0.263	0.425	10	6.188235294	0.917647059	918	910	
2.423	2.647	0.224	0.425	10	5.270588235	1.035294118	1035	1050	
2.423	2.603	0.18	0.425	10	4.235294118	1.223529412	1224	1210	
2.423	2.551	0.128	0.425	10	3.011764706	1.341176471	1341	1330	
2.423	2.494	0.071	0.425	10	1.670588235	1.670588235	1671	1690	
2.423	2.423	0	0.425	10	0	0			
Summen:					10	10000	10004		

DE: Diese nun berechneten Widerstände wurden anschließend in der vorletzten Spalte auf ganzzahlige Werte für gerundet. Schließlich wurden aus der E96-Reihe die am nächsten liegenden, realen Widerstandsgrößen rausgesucht und notiert. Diese sollen nun für den Spannungsteiler auf dem Board verwendet werden.

Im Gesamtwiderstand des E96-Spannungsteilers ergibt sich dabei eine Abweichung von nur 4Ω, was 0.04% entspricht.

Als letzter Kontrollschritt wurden für diesen E96-Spannungsteiler rückwärts die Spannungen an den Ausgangsknoten berechnet, um diese mit den ganz am Anfang gemessenen und gesuchten Eingangsspannungen zu vergleichen und den prozentualen Fehler zu berechnen.

EN: These now calculated resistances were then rounded to integer values in the second last column. Finally, the closest real resistance values were selected from the E96 series and noted down. These are now to be used for the voltage divider on the board.

In the total resistance of the E96 voltage divider, this results in a deviation of only 4Ω, which corresponds to 0.04%.

As a last control step, the voltages at the output nodes were calculated backwards for this E96 voltage divider in order to compare them with the input voltages measured and searched for at the very beginning and to calculate the percentage error.

U_min - offset (im Spannungsteiler)	f. Halbtonschritte: U_gesucht	U_aus rel. zu offset	Span.Bereich U_ein	tats. R_ein [Ω]	tats. R_aus [Ω]	nächster widerstand aus E96 Reihe	U_aus	Spannung Fehler[%]
2.423	2.848	0.425	0.425	10004	10004	330	2.848	0
2.423	2.834	0.411	0.425	10004	9674	402	2.833980608	0.00068427
2.423	2.817	0.394	0.425	10004	9272	442	2.816902439	0.00346329
2.423	2.798	0.375	0.425	10004	8830	536	2.79812495	0.00446569
2.423	2.775	0.352	0.425	10004	8294	619	2.775354058	0.01275886
2.423	2.749	0.326	0.425	10004	7675	698	2.749057077	0.00207629
2.423	2.719	0.296	0.425	10004	6977	787	2.719403938	0.01485614
2.423	2.686	0.263	0.425	10004	6190	910	2.685969812	0.0011239
2.423	2.647	0.224	0.425	10004	5280	1050	2.647310276	0.01172179
2.423	2.603	0.18	0.425	10004	4230	1210	2.602703119	0.01140535
2.423	2.551	0.128	0.425	10004	3020	1330	2.551298681	0.01170837
2.423	2.494	0.071	0.425	10004	1690	1690	2.494796281	0.03192789
2.423	2.423	0	0.425	10004	0	0	2.423	0
max_Fehler [%]						0.031927886		
øFehler [%] =						0.009653804		

DE: Aus der Kontrollrechnung geht eine maximale Abweichung der Ausgangsspannung von von 0.032% bei durchschnittlich 0.0097%. Bei den schließlich verwendeten Widerstand im DOT handelt es sich um Metalloxidwiderstände mit einer Toleranz von maximal einem Prozent, sodass davon ausgegangen werden kann, dass das kaum bis nicht hörbare Abweichungen erzeugt.

EN: From the control calculation, a maximum deviation of the output voltage of 0.032% with an average of 0.0097%. The resistors finally used in the DOT are metal oxide resistors with a maximum tolerance of one percent, so it can be assumed that this produces hardly audible to non-audible deviations.