

# Kohina mittauksissa

---

---

- Kohinan ominaisuuksia
- Kohinamekanismit
  - Terminen kohina
  - Raekohina
  - $1/f$  – kohina
  - (Kvantisointikohina)
- Kohinan käsittely
  - Kohinalähteiden yhteisvaikutus
  - Kohinakaistanleveys
  - Signaali-kohina – suhde
  - Kohinaluku
  - Kohinalämpötila

## Kohinan ominaisuuksia

---

---

- Kohina on täysin satunnainen signaali
  - Eri taajuuskomponenteilla on satunnainen taajuus ja vaihe
  - Hetkellistä amplitudia ei voida ennustaa

- Kohinan aikakeskiarvo on nolla:  $\langle n(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n(t) dt = 0$

- Kohinan varianssi ei ole nolla, joten kohinalla on teho:

$$\delta_n^2 = \langle n(t)^2 \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n(t)^2 dt$$

- Varianssin neliöjuuri (hajonta) on kohinan tehollisarvo (rms-arvo)

# Kohinan ominaisuuksia

---

- Kohinan spektrinen tehotiheys  $S(f)$  kuvaa kohinatehon jakautumista taajuudessa (yksikkö  $[V^2/Hz]$  tai  $[A^2/Hz]$ )

$$S(f) = \frac{\partial e_n^2}{\partial f}$$

Tehotiheys

$$\delta_n^2(f) = \int_0^{\infty} S(f) df$$

Tehollisarvo

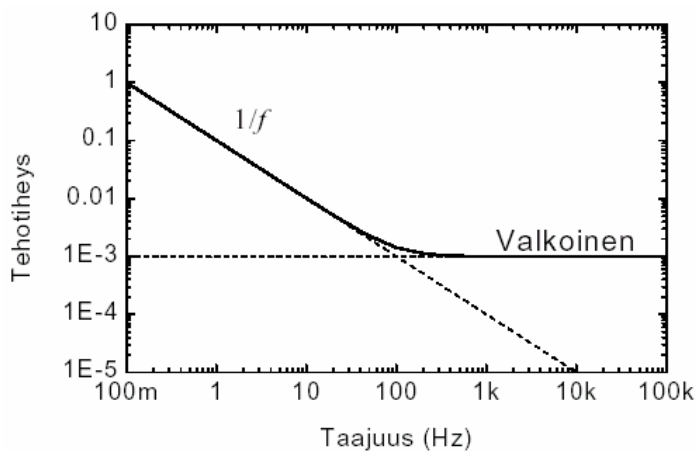
- Valkoinen kohina  $\Rightarrow$  tasainen tehospektri

# Kohinamekanismit

---

## Päätyypit

- Terminen kohina (valkoista kohinaa)
- Raekohina (valkoista kohinaa)
- $1/f$ -kohina



# Terminen kohina

---

- Terminen kohina on lämpötilan aiheuttamaa varauksenkuljettajien satunnaisliikettä johteessa
- Kutsutaan keksijöidensä mukaan myös Johnsonin tai Nyquistin kohinaksi
- Syntyy resistiivisissä komponenteissa, erityisesti vastuksissa
- Myös kapasitanssien resistiiviset ja dielektriset häviöt, sekä induktanssien resistiiviset ja pyörrevirtojen aiheuttamat häviöt aiheuttavat pientä termistä kohinaa
- Terminen kohina määrää resistiivisen komponentin pienimmän kohinatason.

# Terminen kohina ...

---

- Kohinajännitteen spektrinen tehotiheys

$$S_e(f) = 4kTR \quad [\text{V}^2/\text{Hz}]$$

- Kohinajännitteen tehollisarvo (rms)

$$e_n = \sqrt{4kTRB} \quad [\text{V}]$$

$k$  = Boltzmannin vakio ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)

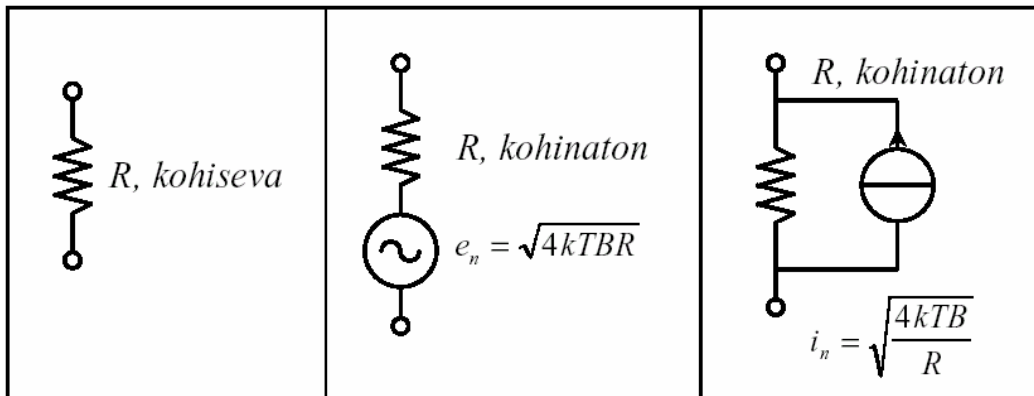
$T$  = absoluuttinen lämpötila (K)

$B$  = kohinakaistan leveys (Hz)

$R$  = resistanssi ( $\Omega$ )

- Suuruusluokka:  $1 \text{ k}\Omega, 1 \text{ Hz} \rightarrow 4 \text{ nV}_{\text{rms}}$   
 $1 \text{ k}\Omega, 10 \text{ kHz} \rightarrow 0.4 \text{ }\mu\text{V}_{\text{rms}}$

# Termisen kohinan malli



- Kytkettyjen resistanssien kohina on verrannollinen muodostuvan ekvivalenttivastuksen arvoon

# Termisen kohinan minimointi

$$e_n = \sqrt{4kTRB}$$

- $B$ , - taajuuskaistan (mittauskaistan) pienentäminen
- $T$ , - jäähdyttäminen
- $R$ , - yleisesti häviöiden pienentäminen, impedanssisovitukset
  - Resistansseja ei yleensä voi pienentää, koska signaalikin pienenee. Lisäksi alkaa kulua tehoa
  - Käytetään resistanssien sijasta kapasitiivisia ja/tai induktiivisia komponentteja, jos mahdollista
  - Signaalien siirto pieni-impedanssisena (virtaviesti)

# Raekohina (shot noise)

---

---

- Diodeissa, transistoreissa, ja elektroniputkissa esiintyy virtakohinamekanismi, jota kutsutaan raekohinaksi.
- Raekohina liittyy virrankulkuun potentiaalivallin yli. Virran kulku ei ole jatkuvaluonteista, vaan tapahtuu yksittäisten virrankuljettajien (elektronit ja aukot) summasta.
- Tällainen potentiaalivalli on esim. kaikkien puolijohdekomponenttien pn-rajapinnalla.

# Raekohina (shot noise)

---

---

Raekohinan tehotiheys:  $S_i(f) = 2qI_{DC}$  [A<sup>2</sup>/Hz]

Raekohinavirran tehollisarvo (rms):

$$I_s = \sqrt{2qI_{DC}B} \quad [\text{A}]$$

$q$  = elektronin varaus ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  C)

$I_{DC}$  = DC-virta (A)

$B$  = kohinakaistan leveys (Hz)



# Raekohinan minimointi

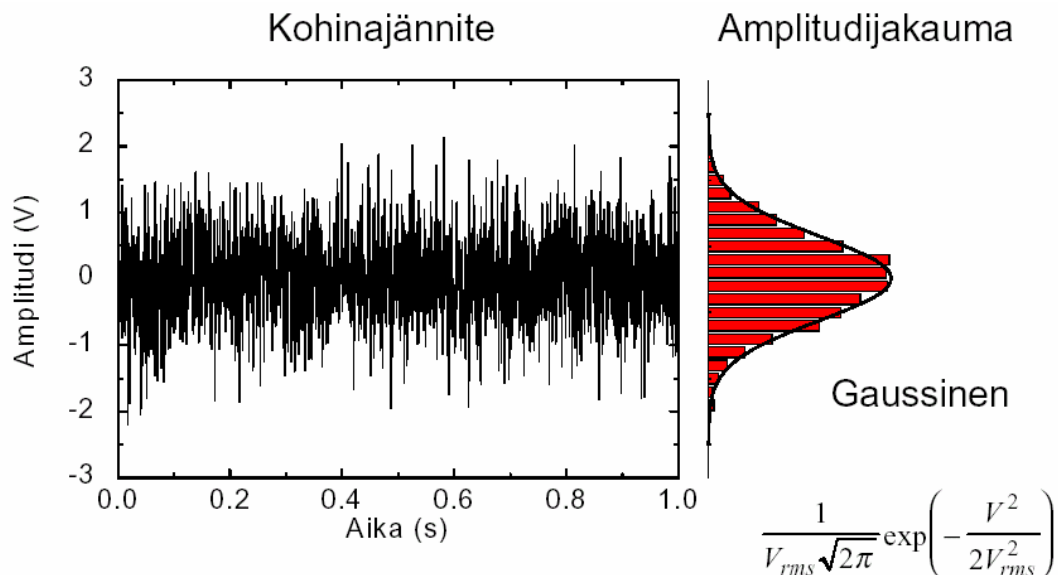
---

$$I_n = \sqrt{2qIB}$$

- Virran minimointi, kunhan se ei pienennä signaalia
- Taajuuskaistan pienentäminen
- Vältetään komponentteja jotka tuottavat raekohinaa:
  - Diodit
  - Bipolaaritransistorit, niiden sijasta FET-transistoreita

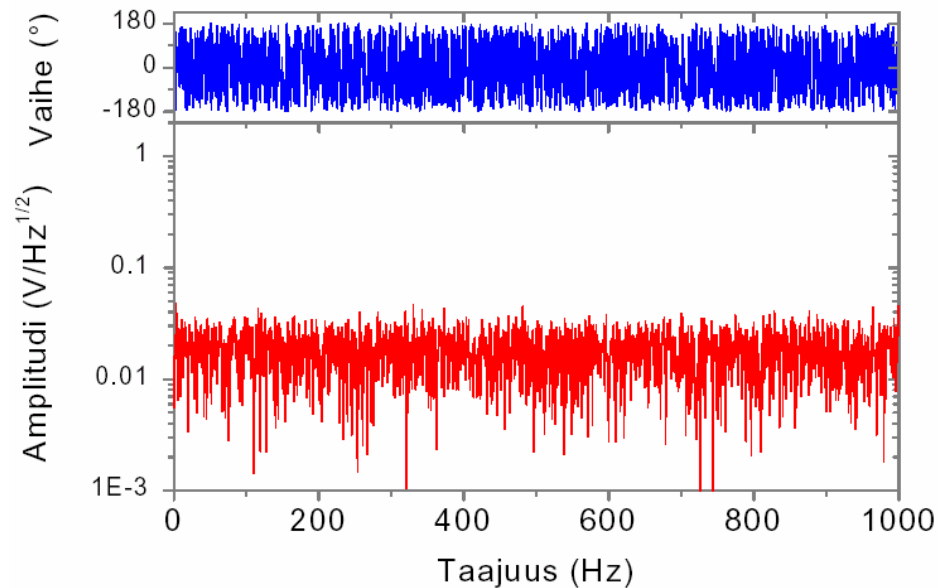
# Valkoinen kohina aikatasossa

---



# Valkoinen kohina taajuustasossa

---



## 1/f - kohina (flicker noise, contact noise, low-frequency noise)

---

- 1/f - kohinan tehospektri ei ole tasainen, vaan kohinan taso kasvaa taajuuden pienentyessä.
- Tehotiheys noudattaa muotoa  $S(f) = K/f^\alpha$ ,  $\alpha = 0.8 - 1.4$
- 1/f - kohina ei varsinaisesti ole yksittäinen kohinamekanismi, vaan sisältää useita eri syntymekanismia.
- Ilmenee esim. Operaatiovahvistinten bias-jännitteiden ryömimisenä

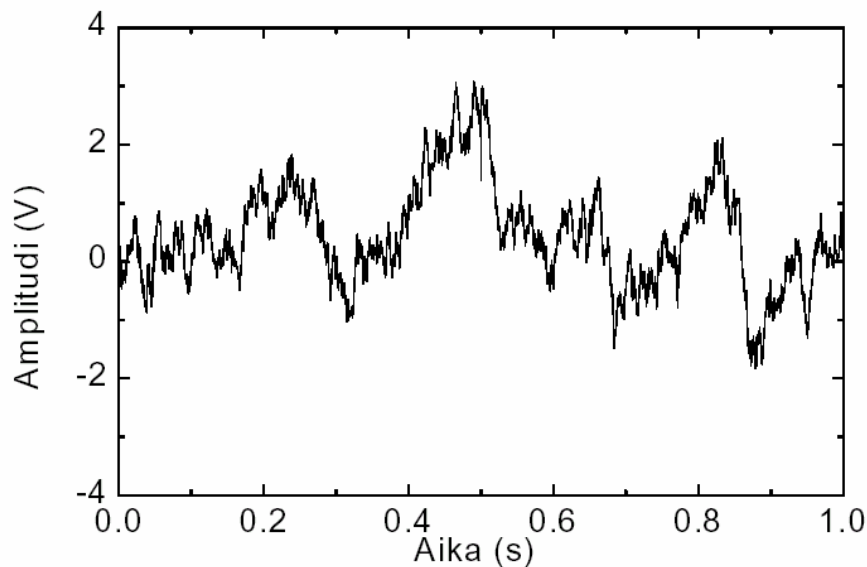
# $1/f$ - kohina (flicker noise, contact noise, low-frequency noise)

---

- Esitettyjä syntymekanismeja:
- Generaatio-rekombinaatio mekanismi puolijohteissa
- Virran kulku epähomogeenisessa johteessa (massavastukset), kohinan tehotiheys verrannollinen virtaan
- $1/f$  - kohinalle ( $\alpha = 1$ ) on ominaista, että kohinateho on sama jokaista taajuusdekadia kohti: esim. 10 - 100 Hz tai 1000 - 10000 Hz.

## $1/f$ - kohina aikatasossa

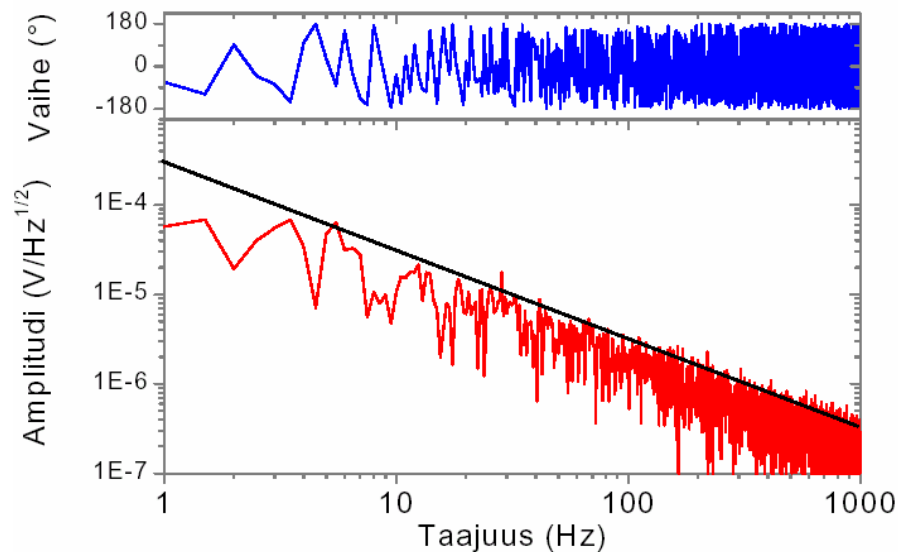
---





# 1/f - kohina taajuustasossa

---



# 1/f - kohinan minimointi

---

- Keskiarvoistus ei juurikaan auta. Viimeisin lukema on paras
- Siirretään mittaus suuremmille taajuuksille esim. moduloimalla
- Komponenttien valinta:
  - ✓ Metallikalvovastuksilla pienempi 1/f - kohina kuin massa/hiilivastuksilla
  - ✓ JFETeillä pienempi kuin MOSFETeillä
  - ✓ Chopper-stabiloidut operaatiovahvistimet
- Hyvät liitoskontaktit

# Kohinalähteiden yhteisvaikutus

- Kohinalähteiden yhteisvaikutus saadaan summaamalla neliöllisesti.
- Kohinajännite- ja kohinavirtalähteet, joiden generaatioprosessit ovat itsenäisiä, eivät korreloi keskenään.
- Korreloimattomille kohinalähteille:

$$e_{n,tot}^2 = e_{n,1}^2 + e_{n,2}^2$$

- Mikäli kohinalähteillä on korrelaatiota (harvinaista):

$$e_{n,tot}^2 = (e_{n,1} + e_{n,2})^2 = e_{n,1}^2 + e_{n,2}^2 + 2\gamma e_{n,1}e_{n,2}$$

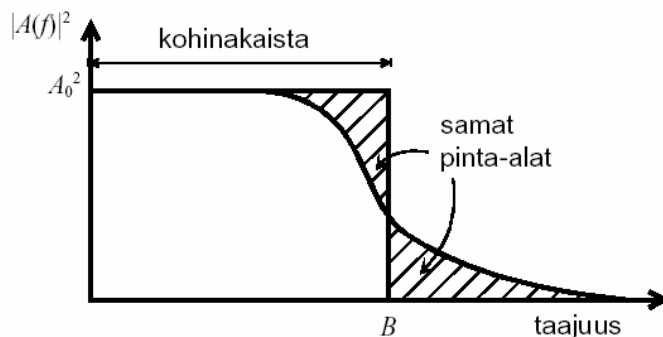
$\gamma$  = korrelaatiokerroin, -1..0..1

# Kohinakaistanleveys

$$B = \frac{1}{|A_0|^2} \int_0^\infty |A(f)|^2 df$$

$A(f)$  = jännitevahvistus

$A_0$  = maksimivahvistus



Kohinakaistanleveyden  $B$  suhde  
3 dB:n kaistanleveyteen  $f_0$

Napojen lkm.	$B/f_0$
1	1.57
2	1.22
3	1.15
4	1.13
5	1.11

# Signaali-kohina - suhde (SNR tai S/N)

---

---

- Signaali-kohina suhde = kohinattoman signaalin tehon  $P_s$  ja kohinatehon  $P_n$  suhde

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_n}$$

- Voidaan esittää myös tehollisarvojen suhteena
- Desibeleinä:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_s}{P_n}\right) = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{V_s}{V_n}\right)$$

## Kohinaluku

---

---

- Kohinaluku  $F$  kuvaa kuinka paljon järjestelmä heikentää signaalikohina suhdetta.

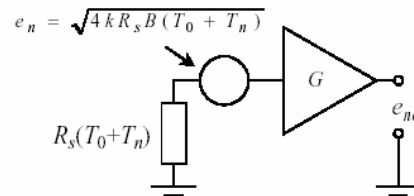
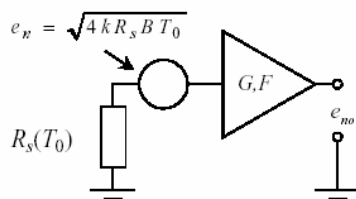
$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{P_{s,in}}{P_{n,in}} \frac{P_{n,out}}{P_{s,out}}$$

- Käytännössä  $F > 1$

- Desibeleinä :  $NF = 10 \cdot \log_{10}(F)$

# (Kohinalämpötila)

- Kohinalämpötila ( $T_n$ ) kuvaa vahvistimen aiheuttamaa lisäkohinaa lähdekohinaan (samoin kuin kohinaluku).
- Ilmaisee vahvistimen kohinan lähderesistanssin ( $R_S$ ) lisäkohinana.
- Kohinalämpötila:  $T_n = T_0 \cdot (F-1)$



# Kertaus

- Termistä kohinaa syntyy kaikissa häviöllisissä komponenteissa.

$$e_n = \sqrt{4kTRB} \quad [\text{V}]$$

- Raekohinaa syntyy kun virtaa kuljettavat yksittäiset varauksenkuljettajat mm. pn-liitoksissa.

$$I_n = \sqrt{2qIB} \quad [\text{A}]$$

- Korreloimattomien kohinalähteiden yhteisvaikutus:

$$e_{n,tot}^2 = e_{n,1}^2 + e_{n,2}^2$$