

Föreläsning 8

Brus och brusparametrar

Kapitel 3.2, 3.4 - 3.6 och 6.5

Senaste föreläsningen

- Bilateral design
 - Simultan konjugatmatch om ovillkorligen stabil
- Konstant-gain cirklar
 - G_S och G_L vid unilateral design
 - G_A och G_P vid bilateral design

Dagens föreläsning

- Introduktion till brus
- Bruskällor
- Brusets påverkan på kommunikation
- Brus i kretsar och transistorer
 - Brustemperatur
 - Brusfaktor
 - Friis formel
 - Brusparametrar

Historielektion om Brus

- Termiskt brus är variationer i ström och spänning för ett elektriskt nät på grund av termisk agitation av elektronerna (Brownisk rörelse, Robert Brown 1828)
- Fluktuerande laddningar i en förlustbehäftad resistans i termisk jämvikt ger upphov till en brusspänning på dess portar (Albert Einstein 1906)
- Nyquist teoremet för termiskt brus härleds och bevisas genom mätningar, grunden till all teori om termiskt brus i elektriska komponenter (Nyquist och Johnson 1928)
- Elektriska komponenter genererar brus!

Olika typer av brus

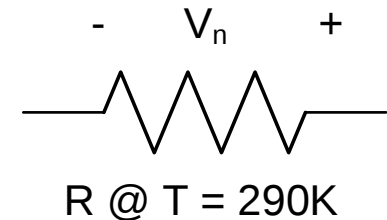
- Termiskt brus (Vitt brus inget frekvensberoende)
 - Förekommer i alla förlustbehäftade komponenter
 - Definitionen av brus i elektriska komponenter
- "Hagelbrus" (Vitt brus)
 - Strömbrus, $I_n = 2qI_c$, förekommande i aktiva komponenter
- Popcorn brus (frekvensberoende, $1/f^2$)
 - Förekommande i aktiva komponenter
 - Orsakas av fällor i halvledarmaterialet
- Flicker brus ($1/f$ brus)
 - Förekommer framförallt i aktiva komponenter
 - Exakt orsak okänd, men relaterat till defekter/fällor i material

Vad är termiskt brus

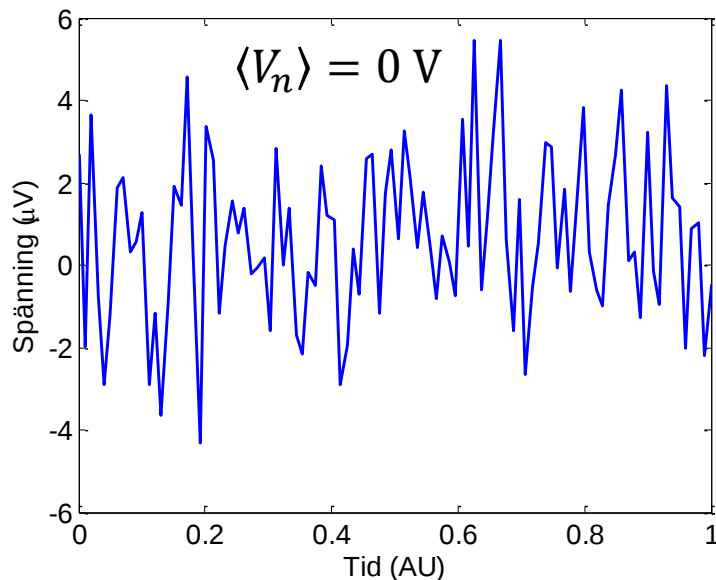
- Slumpmässig variation av spänning och ström
 - Denna ström/spänning existerar även vid avsaknad av signalkälla på ingången
 - Elektriska komponenter generar brus
 - Brus finns ofta också överlagrat på signalen
- Matematiskt beskrivs brus som en stokastisk process som representeras av en sannolikhetsfördelning
 - Momentanvärde saknar mening,
 - Brus måste representeras statistiskt
 - Medelvärde, varians och korrelation

Exempel på brus

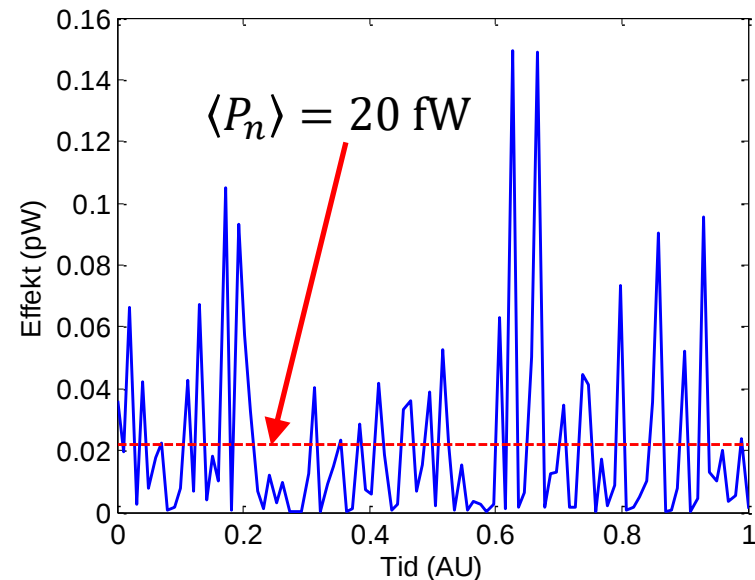
- 50 Ω resistans
- 5 MHz bandbredd (typisk bandbredd i 3G)



$$V_{n,RMS} = \sqrt{4kTBR}$$

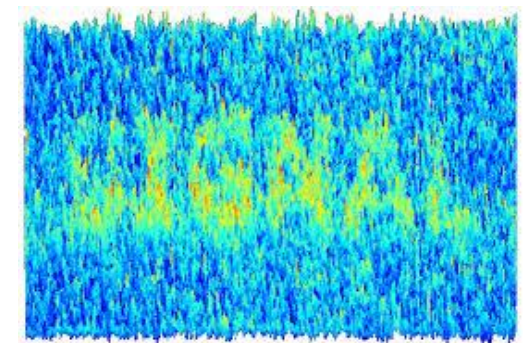
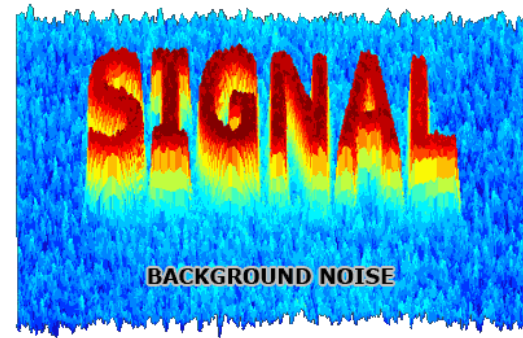
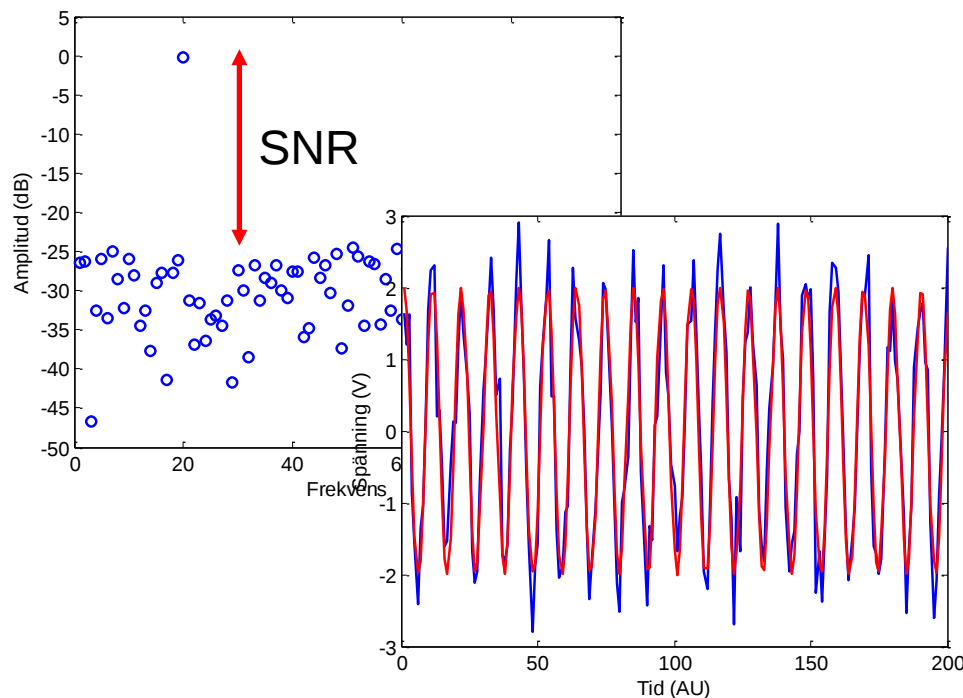


$$P_n = \left(\frac{V_n}{2}\right)^2 \frac{1}{R} = kTB$$



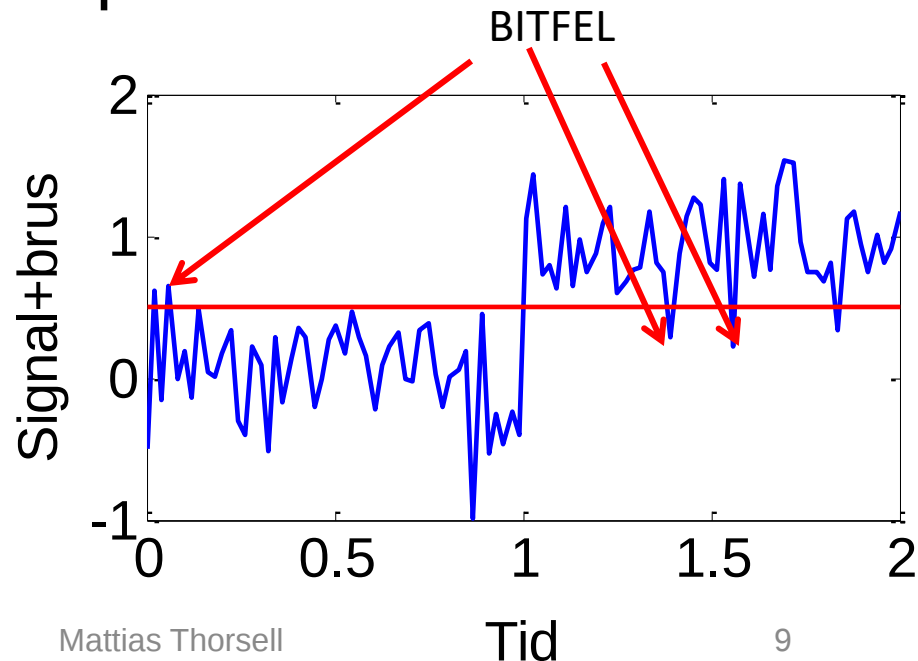
Signal-brus förhållande $SNR = \frac{S_i}{n_i}$

- Förhållande mellan signaleffekt och bruseffekt
- Lågt SNR påverkar signalen



Brus vid kommunikation

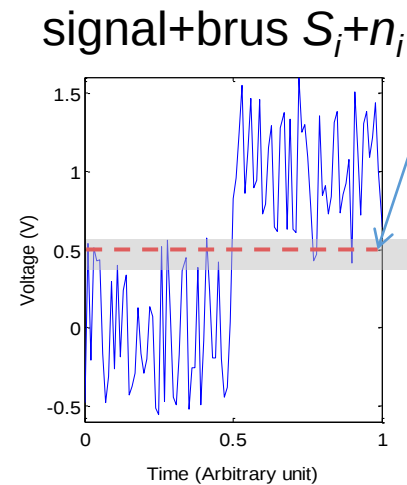
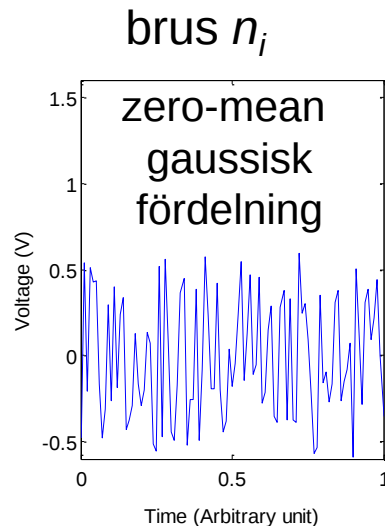
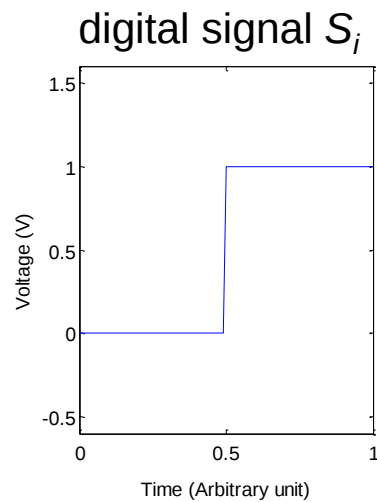
- Minskat signal-brus förhållande (SNR)
 - Ökad risk för bitfel för en bestämd datatakt
 - Minskad datatakt för ett visst acceptabelt bitfel
- Bitfel när brusets amplitud lika med tröskelnivån



Sannolikhet för bitfel

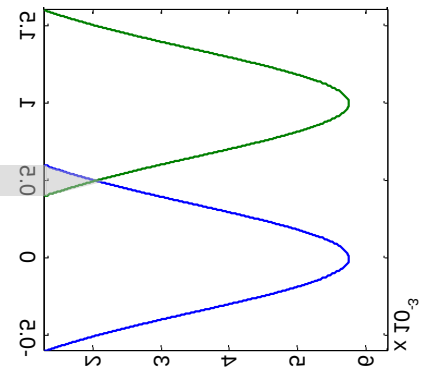
Sannolikeheten för bitfil beror på
Signal-brus förhållande:

$$SNR = \frac{S_i}{n_i}$$



Risk för för bitfel

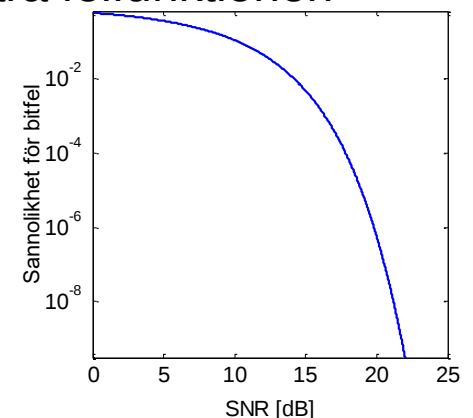
Gaussisk fördelning



Komplementära felfunktionen

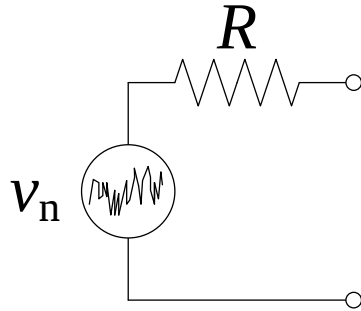
$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2} du$$

$$x = \frac{V_0}{2\sqrt{2}\sigma}$$



Representation av brus

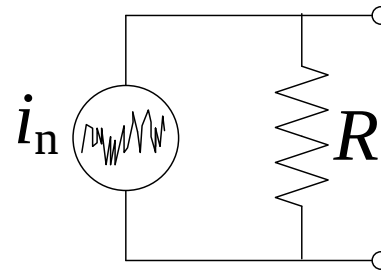
- Brusspänning



$$V_{n,rms} = \sqrt{4kTB R}$$

$$P_n = \left(\frac{V_n}{2} \right)^2 \frac{1}{R} = kTB$$

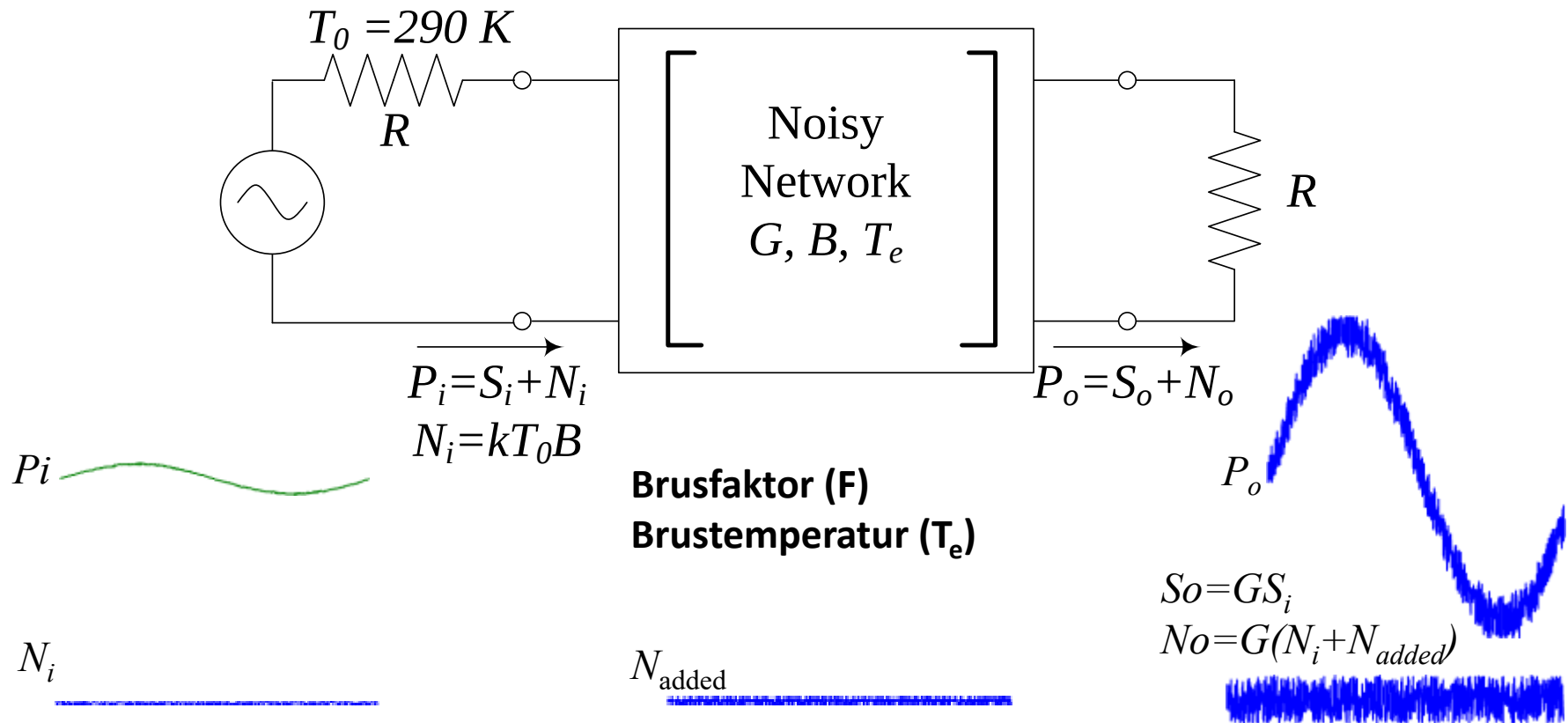
- Brusström



$$i_{n,rms} = \sqrt{\frac{4kTB}{R}}$$

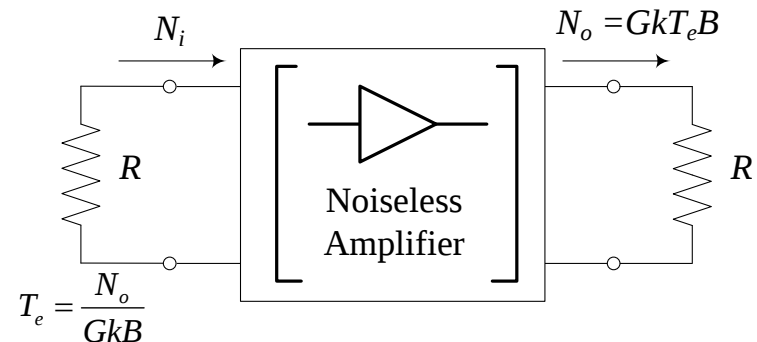
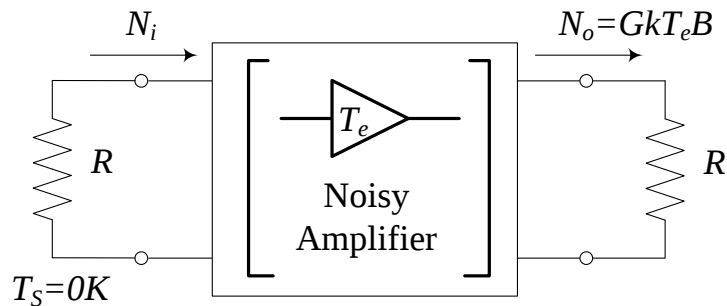
$$P_n = R \left(\frac{i_n}{2} \right)^2 = kTB$$

Brus i en tvåport



Ekvivalent brustemperatur T_e

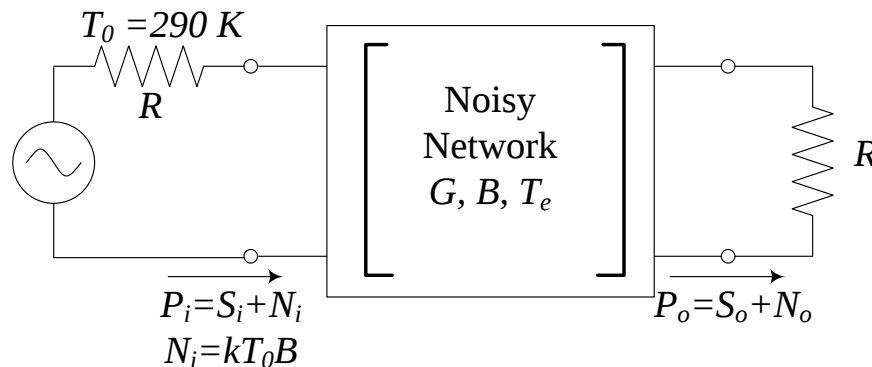
- Ett element med ekvivalent brustemperatur T_e adderar lika mycket brus som en resistans vid temperaturen T_e kopplad till ingången



Brusfaktor F

- Brusfaktorn, definieras som försämringen av signal-brus förhållandet SNR (signal to noise ratio)

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} = 1 + \frac{N_{added}}{N_i} \geq 1$$



- Brusfaktor och brustemperatur är alternativa sätt att ange en komponents brus

Samband mellan F och T_e

- Relationen mellan brusfaktor och brustemperatur kan skrivas

$$T_e = (F - 1)T_0 \quad T_0 = 290 \text{ K}$$

- Exempel: Förlustfri komponent
 - Brusfaktor $F=1$ ($NF=0$ dB)
 - Brustemperatur $T_e=0$
- Brustemperaturen beskriver direkt adderat brus från komponent
- Brusfaktorn definieras vid en viss temperatur, $T_0=290$ K,
 - Annars skulle den variera med ingångsbruset N_i

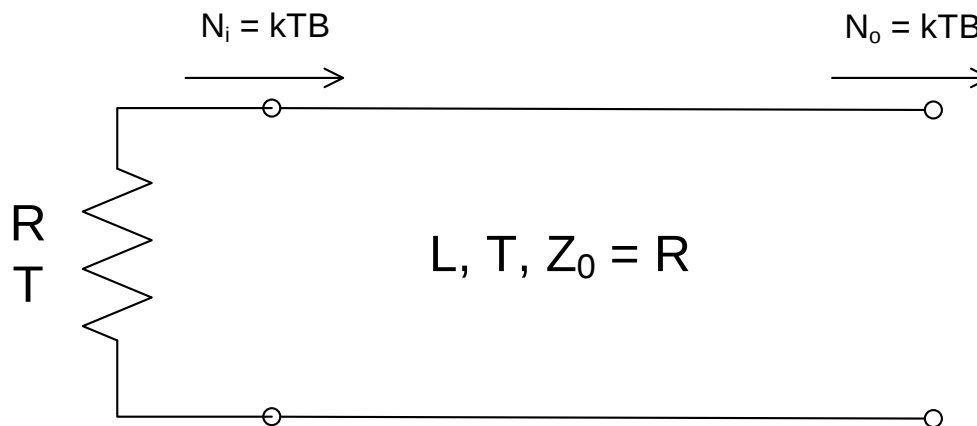
Omvandling

$T_0 = 290 \text{ K}$

T_e	$F = 1 + T_e/T_0$	NF (dB)
0	1.00	0.00
10	1.03	0.15
20	1.07	0.29
40	1.14	0.56
60	1.21	0.82
80	1.28	1.06
100	1.34	1.29
290	2.00	3.01

Brus: Transmissionsledning

- Antag en förlustbehäftad transmissionsledning
- Termisk jämvikt med ingångslasten



$$T = T_0 \Rightarrow F = L$$

Brus: Passiv två-port

- Antag ett godtyckligt passivt elektriskt nät
- Termisk jämvikt med ingångskällan
- Bruset ut från port 2 kan beskrivas på två sätt

$$N_2 = G_A kTB + G_A N_{added}$$

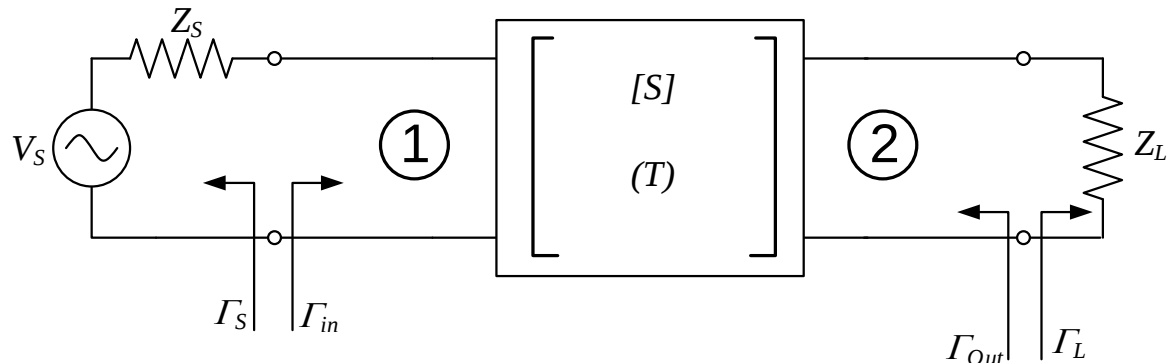
$$N_2 = kTB$$

- Detta ger nätets brustemperatur/brusfaktor

$$N_{added} = \frac{1 - G_A}{G_A} kTB$$

$$T_e = \frac{N_{added}}{kB} = \frac{1 - G_A}{G_A} T$$

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} = 1 + \frac{1 - G_A}{G_A} \frac{T}{T_0}$$



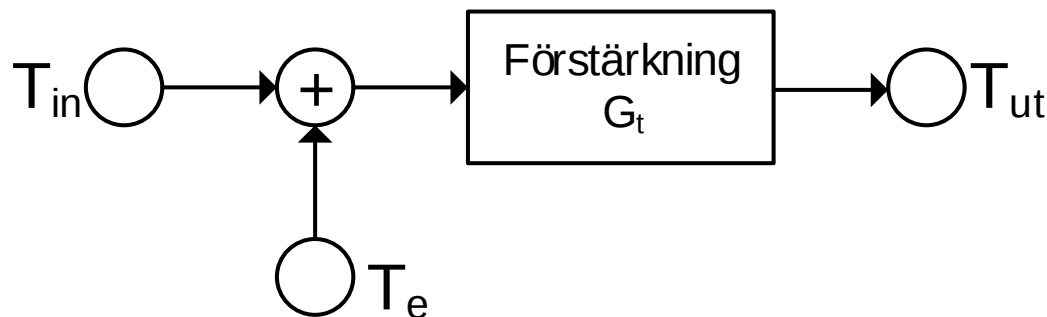
Brus och förstärkardesign

- Alla förstärkare tillför brus
- Designa för minimalt brus
- Avvägning mellan brus och förstärkning
- Minimera brus för kaskadkopplade förstärkare

Brus från en förstärkare

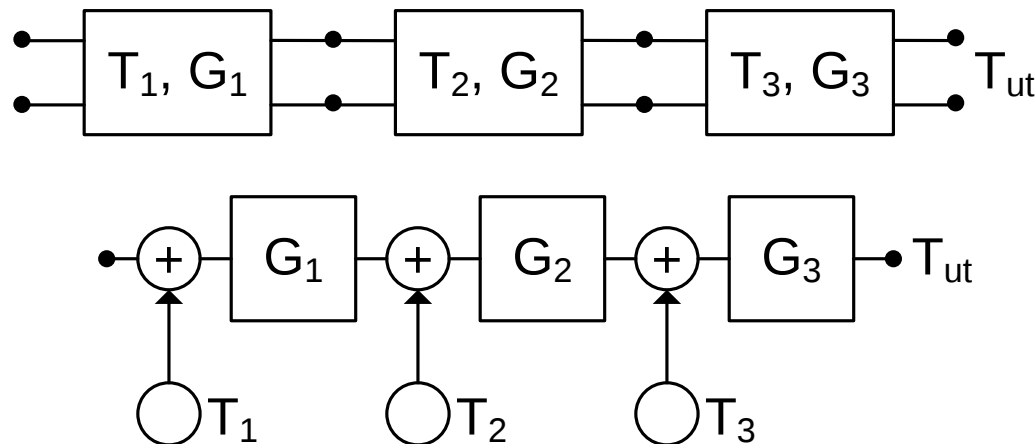
- Brustemperaturen på utgången ges av ingångsbruset (T_{in}) ekvivalenta brustemperaturen (T_e) samt förstärkningen (G_t)

$$T_{ut} = (T_{in} + T_e)G_t$$



Kaskad av flera förstärkare

- En mottagare består ofta av flera steg
- Behov av att bestämma en mottagares totala tillförda brus



$$T_{ut} = ((T_1 G_1 + T_2) G_2 + T_3) G_3$$

Friis formel

- Brustemperaturen på utgången ges av: $T_e = \frac{T_{ut}}{G_t}$
- En kaskadkoppling med tre steg beskrivs av

$$T_e = \frac{T_{ut}}{G_1 G_2 G_3} = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2}$$

- Vilket ger Friis formel: $T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_M}{G_1 G_2 \dots G_{M-1}}$

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (3.77)$$

- Notera att första steget har störst inverkan på totala bruset

Lågbrusförstärkare

- Används på ingången till en mottagare för att minimera totala bruset
- Optimeras för minimalt tillfört brus
 - Samt tillräcklig förstärkning
- Om förstärkningen är liten får efterkommande steg större inverkan på mottagarens totala brusfaktor (Friis formel)
- Avvägning mellan förstärkning och brus
 - Nyckeltal för lågbrusförstärkare:
 - Totala bruset hos kaskadkopplade förstärkare minimeras om de placeras i ordning med växande M

$$M = \frac{F - 1}{1 - \frac{1}{G_A}}$$

Övning

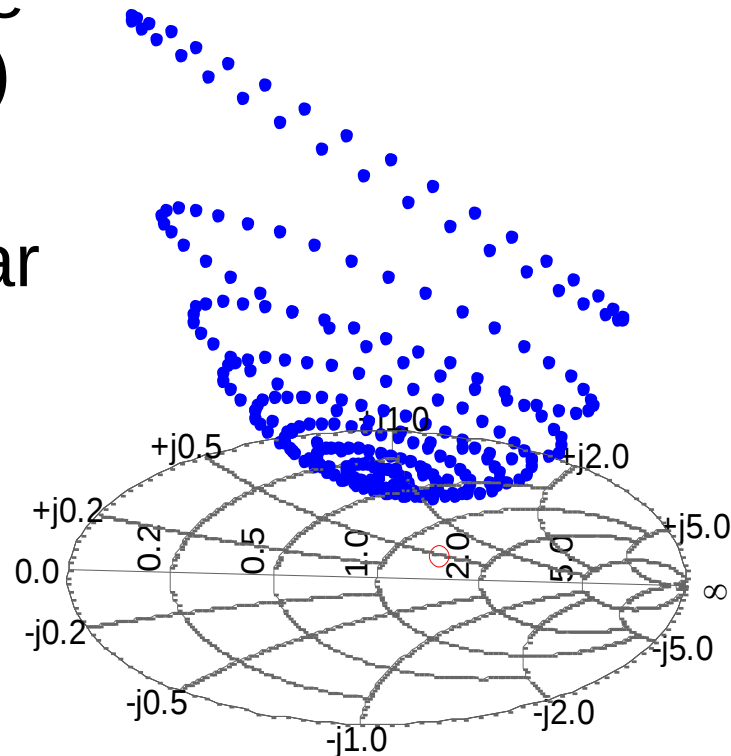
- En mottagare skall byggas av tre förstärkare
 - Förstärkare 1 $G=10\text{dB}$, $F=2\text{dB}$
 - Förstärkare 2 $G=12\text{ dB}$, $F=5\text{ dB}$
 - Förstärkare 3 $G=10\text{ dB}$ $F=5\text{ dB}$
- I vilken ordning ska de sitta för minimalt brus?
 - Beräkna totala bruset och totala förstärkningen om de sitter i denna ordning

Sammanfattning brusfaktor

- Brus genereras av alla elektriska komponenter
- Brusfaktor och förstärkning viktiga för en LNA
- Beroende på ordningen i en kaskadkoppling av förstärkare kan mottagarens prestanda påverkas
- Hur designas en förstärkare map avvägning mellan förstärkning och brus
 - Konst-brus cirklar/konst-gain cirklar

Brus från en transistor

- Transistors adderade brus beror på Z_S (Γ_S)
- Minimalt brus (F_{MIN}) fås om man anpassar till Z_{OPT} (Γ_{OPT})
- Brusparametrar måste mätas!



Konstant-brus cirklar

- Vid avvikande källimpedans ges brusfaktorn av

$$F = F_{\min} + \frac{R_N}{G_S} |Y_S - Y_{\text{opt}}|^2 \quad (6.56)$$

$Y_S = G_S + jB_S$	Källadmittans sedd från transistorn
Y_{opt}	Optimal källadmittans för lågt brus
$F_{\min}$	Transistorns lägsta brusfaktor (@ Y_{OPT})
R_N	Ekvivalent brusresistans

- Konstant F utgör konstant-brus cirklar runt $F_{\min}$

Konstant-brus cirklar

- Centrum av cirkeln

$$C_F = \frac{\Gamma_{\text{opt}}}{N+1} \quad (6.63a)$$

- Radien av cirkeln

$$R_F = \frac{\sqrt{N(N+1-|\Gamma_{\text{opt}}|^2)}}{N+1} \quad (6.63b)$$

- Optimal källreflektionsfaktor

$$\Gamma_{\text{opt}} = \frac{Y_0 - Y_{\text{opt}}}{Y_0 + Y_{\text{opt}}}$$

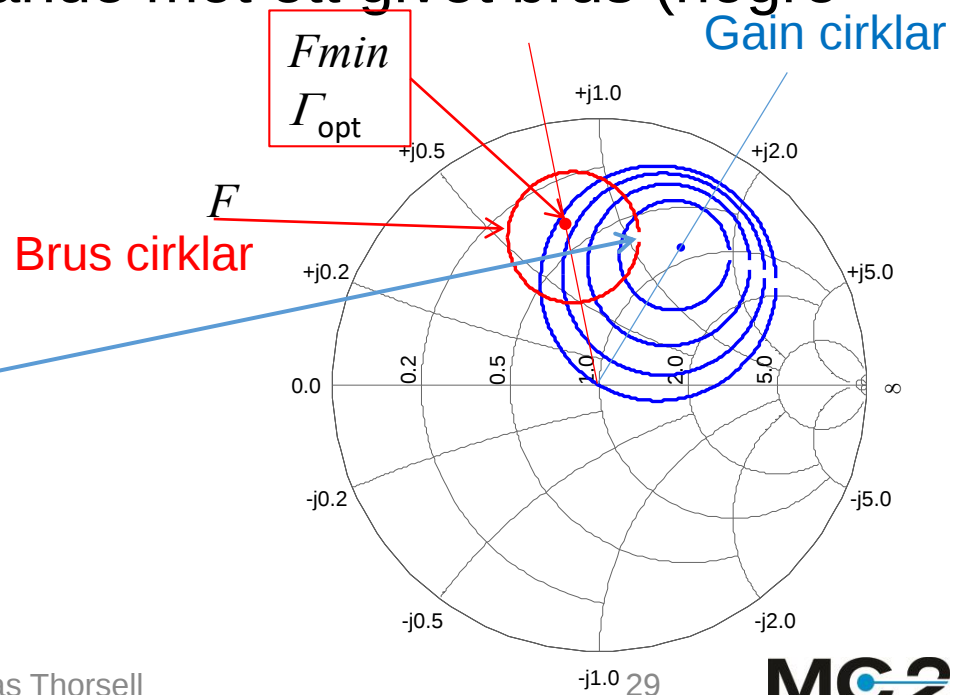
- Definierad brusfaktorparameter

$$N = \frac{|\Gamma_S - \Gamma_{\text{opt}}|^2}{1 - |\Gamma_S|^2} = \frac{F - F_{\min}}{4R_N / Z_0} |1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2 \quad (6.61)$$

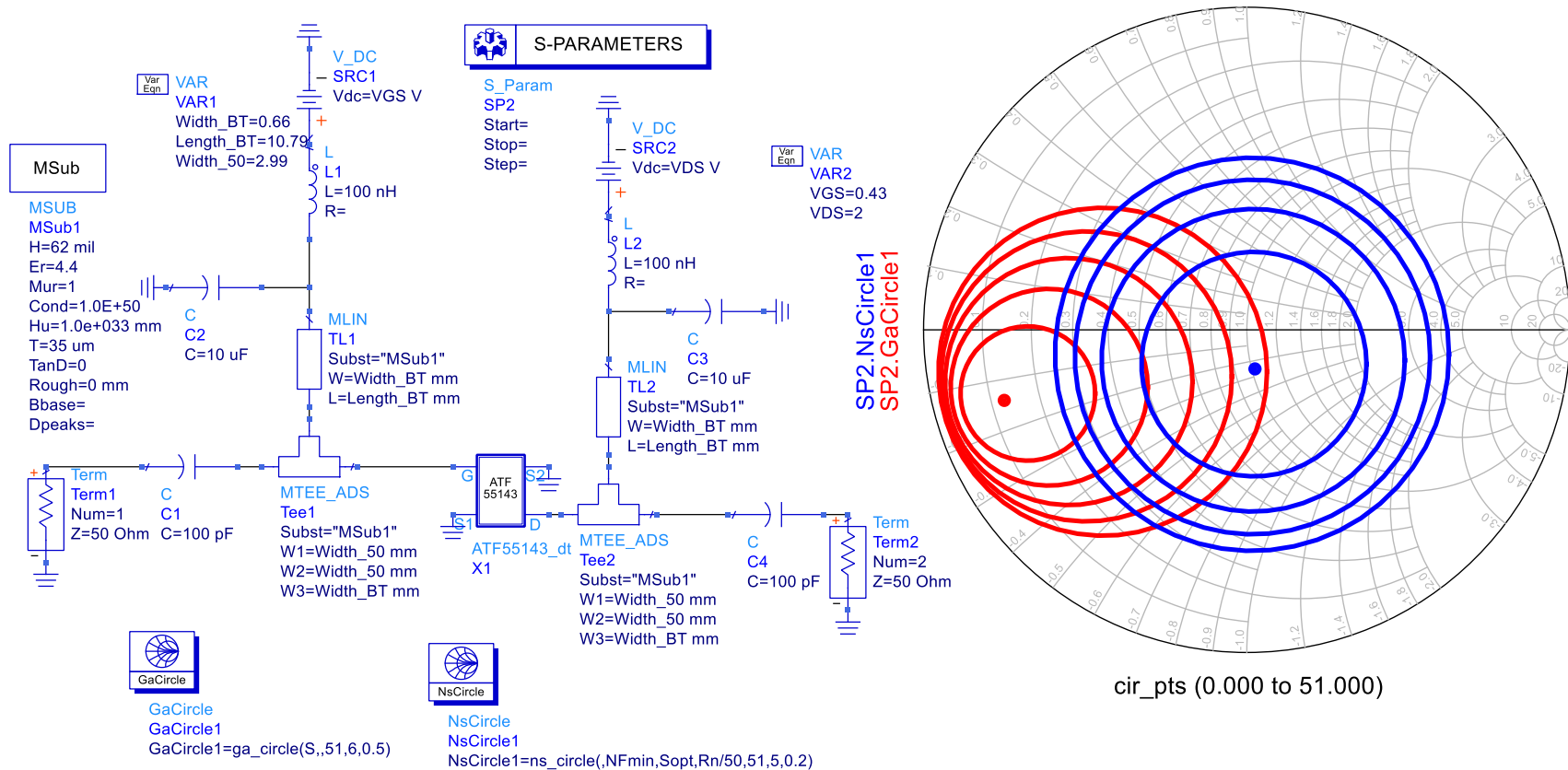
Konstant-brus cirklar

- Användbart för avvägning mellan brus och förstärkning
 - Likt konstant-gain cirklar så förekommer konstant-brus cirklar för Γ_s svarande mot ett givet brus (högre än $F_{\min}$)

Skärning mellan gain cirklar och brus cirklar ger avvägning mellan brus och gain



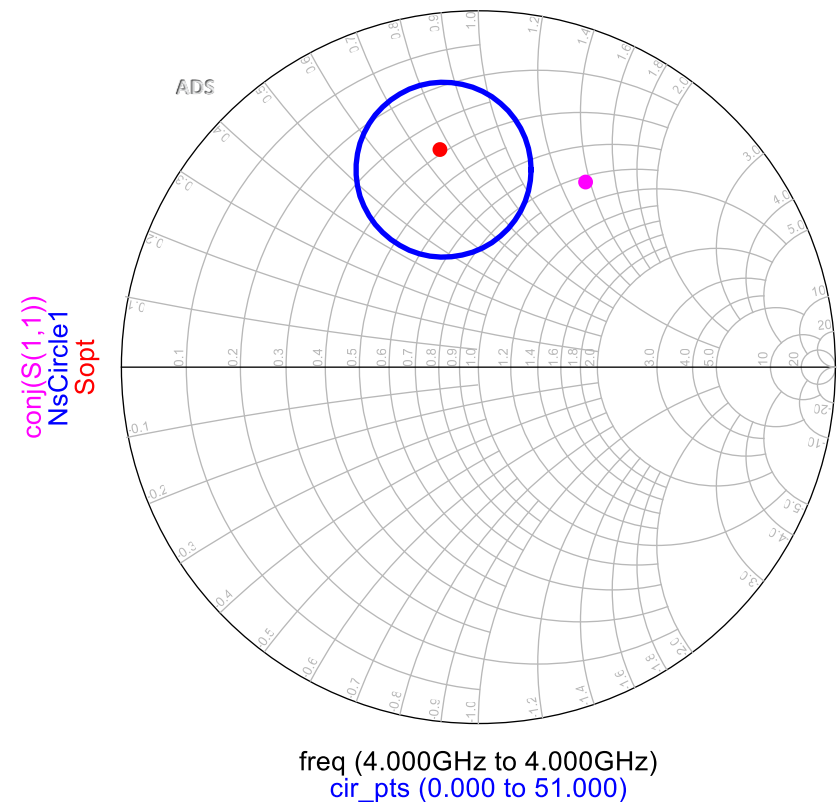
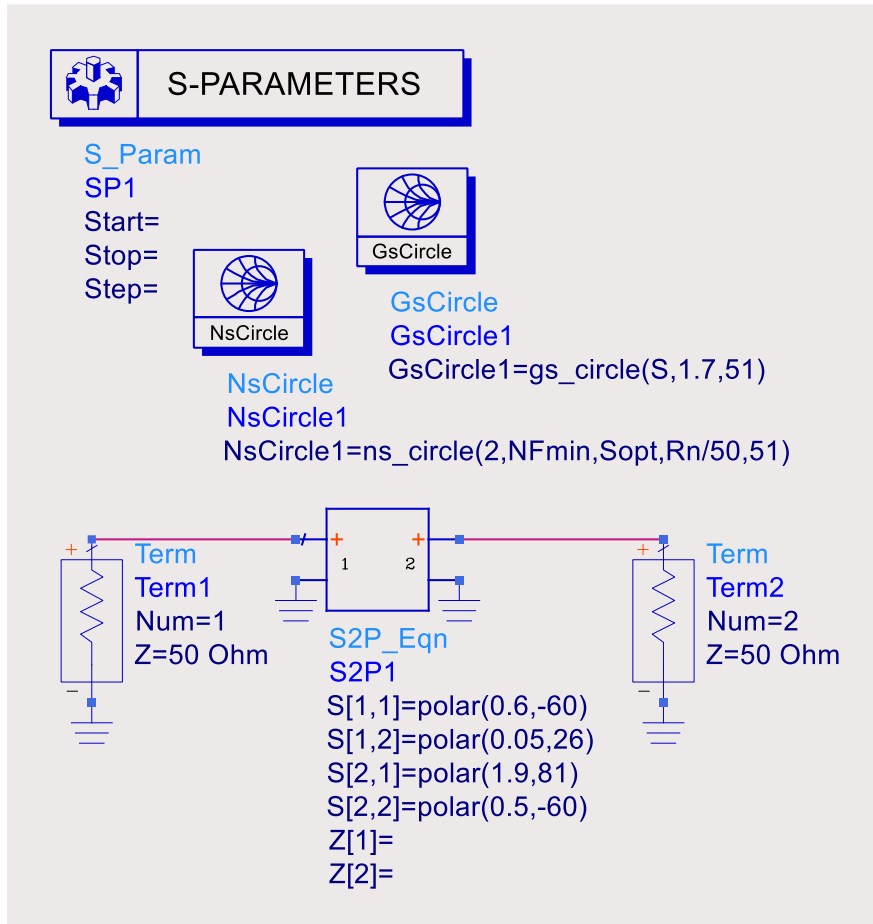
Simulering av ATF-55143



Övning

- Gå igenom exempel 6.5 i kursbok

Pozar 6.5



Sammanfattning

- Alla elektriska komponenter genererar brus
- Lågbrusförstärkare ska addera minimalt med egenbrus
- Första steget i en förstärkarkedja viktigast för lågbrusdesign
- Ingångsanpassningen viktigast för LNA design
- Avvägning mellan G_A (G_S) och F_n

Projektet

- Simulera gain- och brus-cirklar
- Välj Γ_S för önskad avvägning mellan G_A och F_n
- Undersök stabilitet utanför designfrekvensen