

# Senaste föreläsningen

## Föreläsning 11 Effektförstärkare

Kapitel 6.6 i Pozar

- Ickelinjära effekter
  - Förstärkningskompression (P1dB, P1)
  - Intermodulation (IMD)
  - Tredje ordnings skärningspunkt (OIP3, P3)

Mattias Thorsell

1



Mattias Thorsell

2



## Dagens föreläsning

- Effektförstärkare
  - Arbetspunkt
  - Storsignalsimuleringar
  - Övertoner
  - Olika förstärkarklasser

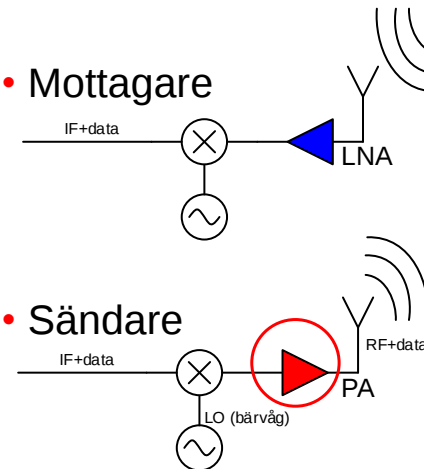
Mattias Thorsell

3



## Ett kommunikationssystem

- Mottagare
  - IF+data
  - LNA
- Sändare
  - IF+data
  - LO (bärvåg)
  - PA
  - RF+data
- LNA påverkar mottagarprestanda
- PA påverkar utsänd effekt
- Både sändare och mottagare påverkar total SNR



Mattias Thorsell

4



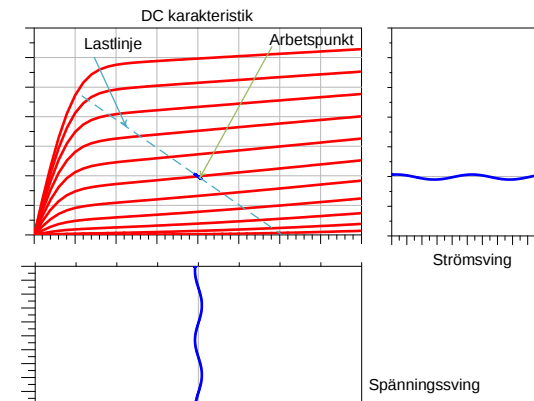
# Effektförstärkaren

- Sista steget innan antennen i sändaren
- Prestandakrav
  - Uteffekt
  - Verkningsgrad
  - Linjäritet

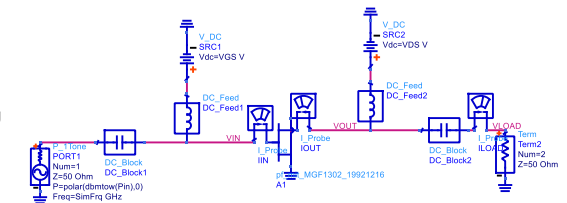
Mattias Thorsell

5

# Småsignalförstärkning



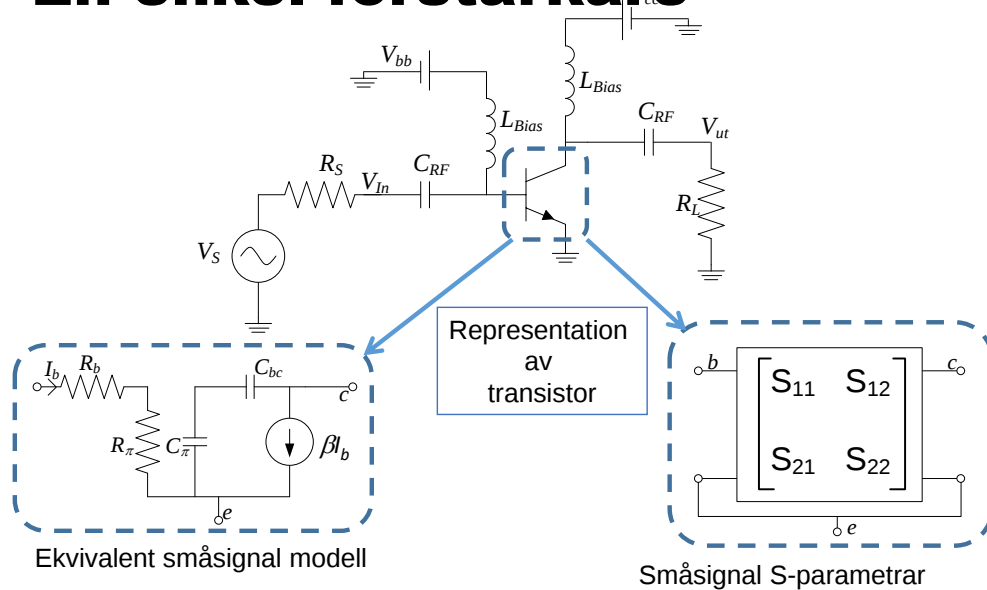
- DC-karakteristik är grunden
- S-parametrar är en linjärisering i en arbetspunkt



Mattias Thorsell

6

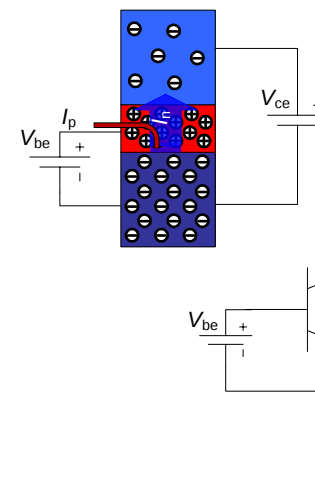
# En enkel förstärkare



Mattias Thorsell

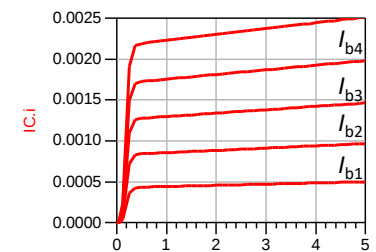
7

# Transistorns DC karaktäristik



Strömmen mellan kollektor och emitter beror på spänningen däremellan ( $V_{ce}$ ) samt strömmen in på basen som beror av spänningen ( $V_{be}$ )

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$



Mattias Thorsell

8

# Storsignalförstärkning

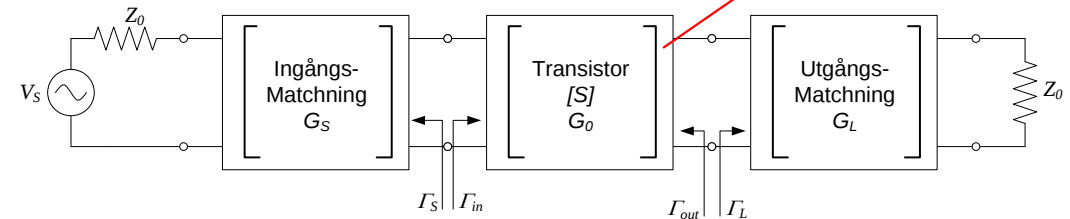
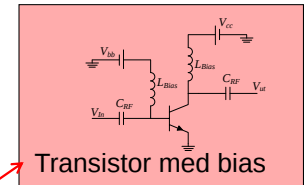
- Transistorns karaktäristik beror av arbetspunkt
  - S-parametrar gäller vid **en** arbetspunkt
  - En småsignalmodell krävs per arbetspunkt
- Om RF signalens amplitud är jämförbar med biasspänningen så gäller inte småsignalantagandet

Mattias Thorsell

9

# Betraktelse av en förstärkare

- En förstärkare är sammansättningen av
  - 1. En stabil transistor med biaseringsnät
  - 2. Matchningsnät för ingång och utgång



Gäller för stora signaler, men  $G_S$  och  $G_L$  kan inte längre beskrivas av S-parametrar

$$G_T = \frac{P_L}{P_{avs}} = \frac{(1 - |\Gamma_S|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2} |S_{21}|^2 \frac{(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - S_{22} \Gamma_L|^2} = G_S G_0 G_L$$

Mattias Thorsell

10

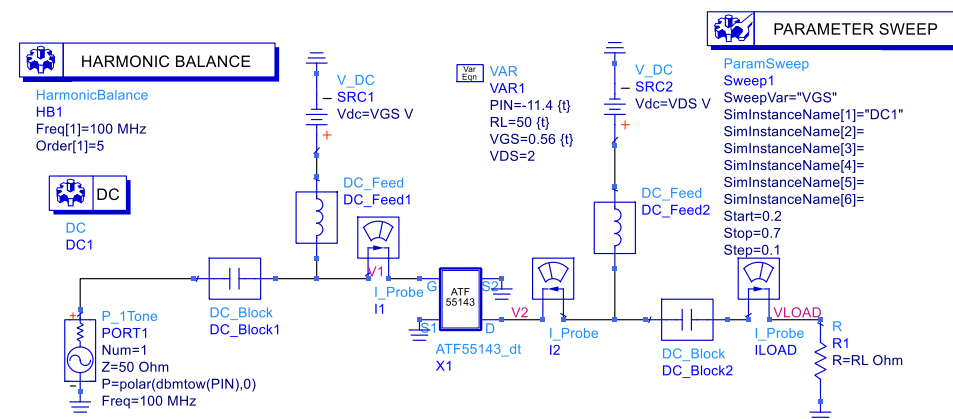
# Harmonic balance i ADS

- En icke linjär kretssimulator
- Löser problemet i frekvensdomän
  - Fundamental
  - Övertoner
- Löser ut nodspänningar och grenströmmar
- Ström och spänningsvågformer genom IFFT
- Simulering med flera olika insignal (frekvenser) är möjliga

Mattias Thorsell

11

# Harmonic balance i ADS

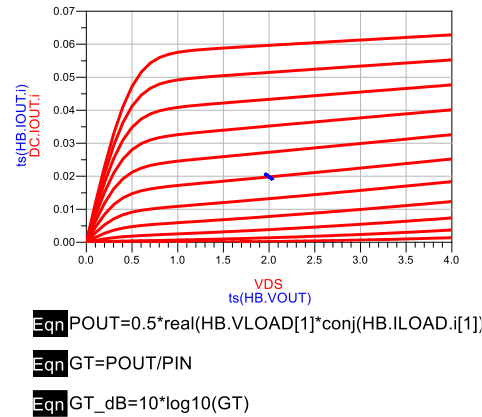


Mattias Thorsell

12

# Simuleringsresultat

- Linjär förstärkning
- RF ändrar inte bias



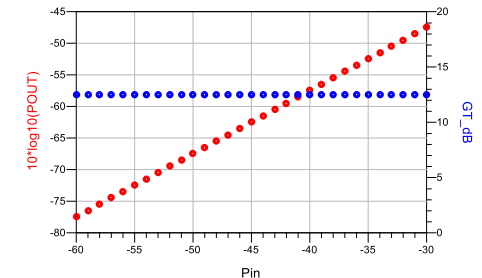
|           |                  |
|-----------|------------------|
| freq      | S(2,1)           |
| 1.000 GHz | 12.521 / 157.470 |
| Pin       | GT_dB            |
| -30.000   | 12.519           |

Mattias Thorsell

13

# Småsignalförstärkare

- In-effekten liten jämfört med DC effekten
- AC signalen orsakar liten svängning kring arbetspunkten
- S-parametrar gäller
- Förstärkningen är oberoende av Pin



Mattias Thorsell

14

## Pin ökar

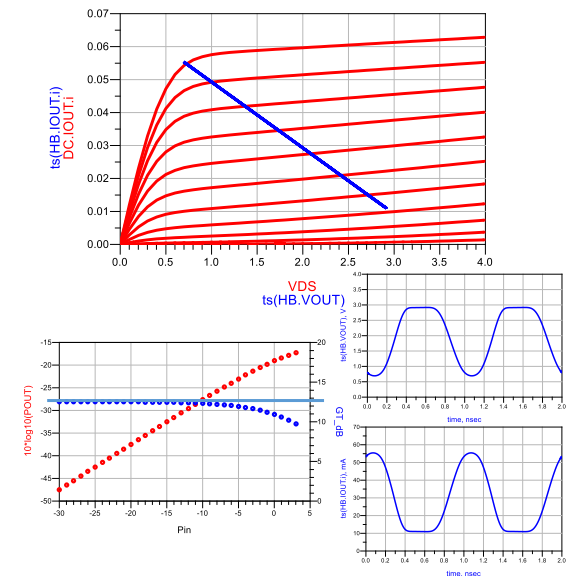
- Ström och spänningssvingen ökar
  - Småsignalmodellen inte längre giltig
  - S-parametrar blir effektberoende
  - Storsignalmodell nödvändig
    - Alternativt load-pull mätningar/simuleringar
- Vid hög in-effekt kommer svinget begränsas av transistorns arbetsområde
- Transistorn blir starkt icke-linjär

Mattias Thorsell

15

## Storsignalförstärkare

- AC och DC effekt likvärdiga
- Stort AC sving
- Förstärkningskompression
- Icke-linjär karakteristik



Mattias Thorsell

16

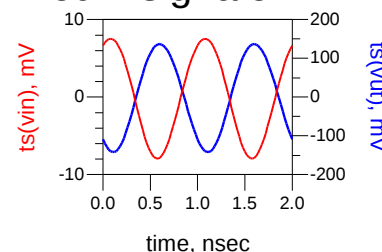
# Ickelinjär förstärkare

- En icckelinjär förstärkare förvränger en perfekt sinusvåg till distorderade vågformer
- En distorderad signal innehåller inte bara grundfrekvensen utan även dess övertoner
  - Orsakar problem i kommunikationssystem
  - Användbart för frekvensmultiplikation och frekvensblandning

# Jämförelse av vågformer

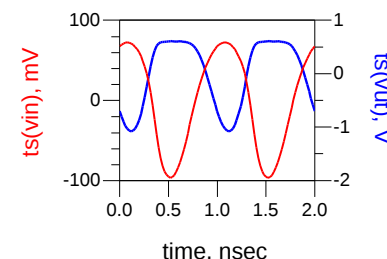
## Småsignalförstärkare

- Linjärt förstärkt signal, 180° fasförskjuten jämfört med insignalen



## Effektförstärkare

- Distorderad utsignal



# Verkningsgrad

- Verkningsgraden anger hur stor del av DC effekt som omvandlas till RF effekt
- Hög verkningsgrad är viktigt
- För en basstation så innebär höjd effektförbrukning ökat behov av aktiv kylning
  - 2-5% av I-ländernas energikonsumtion kommer från kommunikationssystem
- För mobiltelefonanvändaren innebär ökad effektförbrukning kortad batteritid

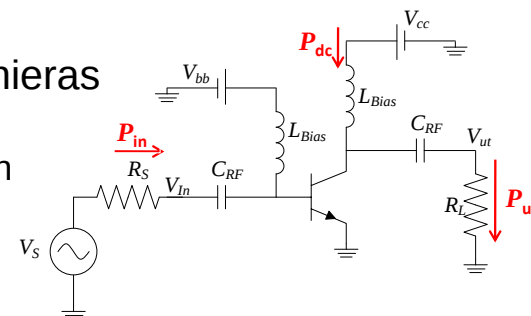
# Definiton av verkningsgrad

- Verkningsgraden definieras på olika sätt

- RF ut delat med DC in

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{dc}}$$

Drain (collector)-efficiency

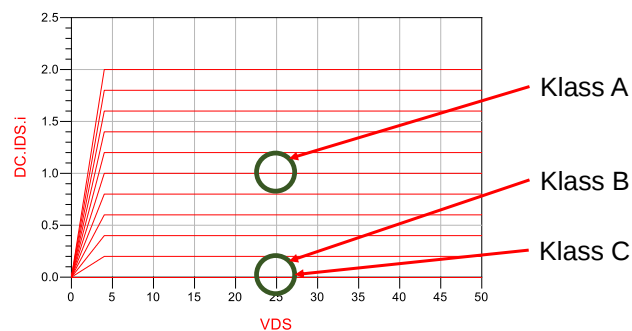


- Power added efficiency (PAE) tar hänsyn till den inkommande RF effekten, viktigt vid lågt gain

$$\eta_{PAE} = \frac{P_{ut} - P_{in}}{P_{dc}} = \left(1 - \frac{1}{G}\right) \frac{P_{ut}}{P_{dc}} = \left(1 - \frac{1}{G}\right) \eta$$

# Förstärkarklasser

- Ges av periodtiden som transistorn leder
  - Klass A: transistorn leder 100% av periodtiden
  - Klass B: transistorn leder 50% av periodtiden
  - Klass C: transistorn leder <50% av periodtiden



Mattias Thorsell

21

# Klass A

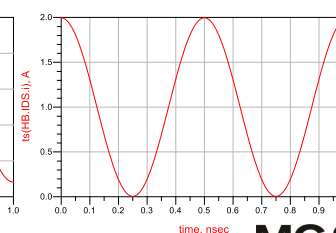
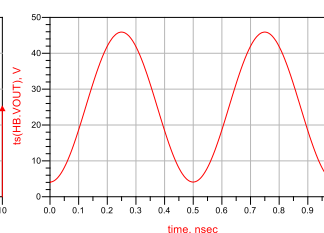
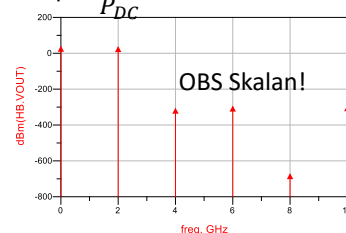
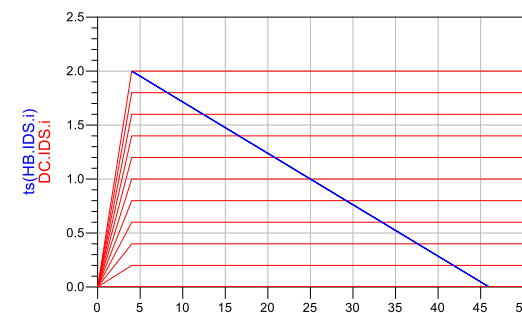
- 100% duty cycle
- Linjär

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} = \frac{V_{max} I_{max}}{4}$$

$$P_{RF,max} = \frac{1}{2} |V(t)| |I(t)| = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} V_{max} \right) \left( \frac{1}{2} I_{max} \right) = \frac{V_{max} I_{max}}{8}$$

$$\eta = \frac{P_{RF}}{P_{DC}} = 50\%$$

$$RL = \frac{V_{max}}{I_{max}}$$



Mattias Thorsell

22

# Klass B

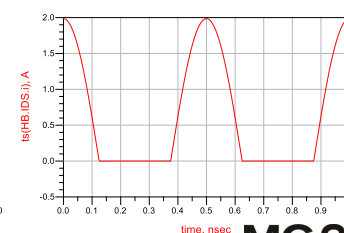
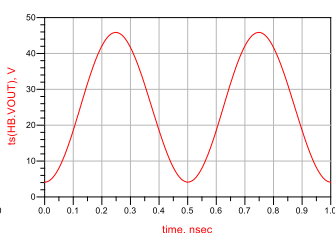
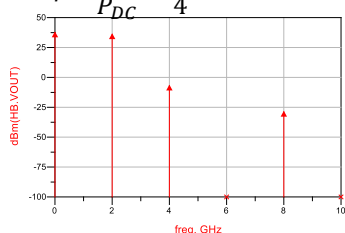
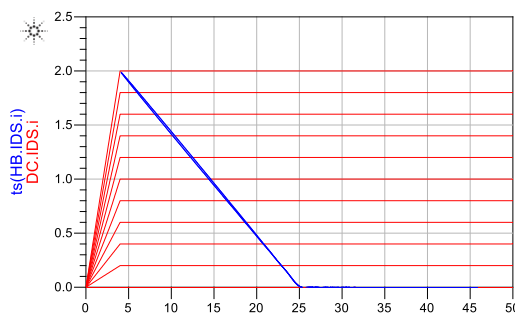
- 50% duty cycle
- Ickelinjär

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} = V_{DD} \frac{I_{max}}{\pi}$$

$$P_{RF,max} = \frac{1}{2} |V(t)| |I(t)| = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} I_{max} \right) V_{DD} = \frac{I_{max} V_{DD}}{4}$$

$$\eta = \frac{P_{RF}}{P_{DC}} = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$

$$RL = \frac{V_{DD}}{I_{max}}$$

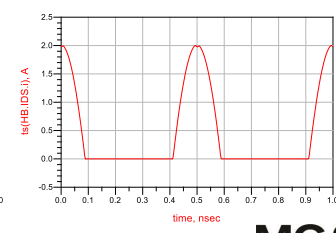
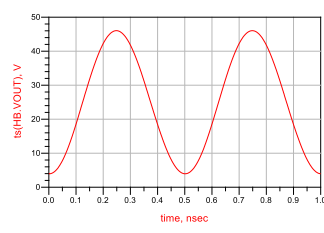
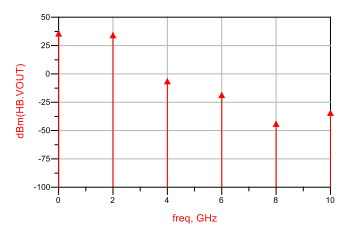
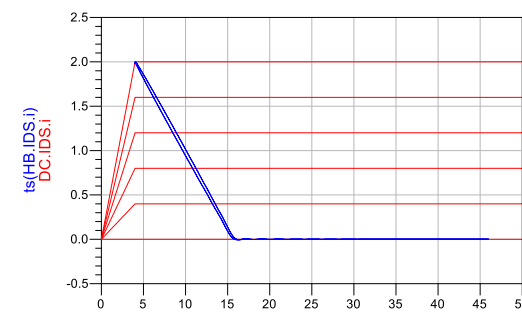


Mattias Thorsell

23

# Klass C

- < 50% duty cycle
- Ickelinjär
- > 78.5 % verkningsgrad



Mattias Thorsell

24

# Sammanfattning: Förstärkarklasser

- Klass A
  - $\leq 50\%$  verkningsgrad
  - Linjär
- Klass B
  - Leder 50% av tiden
  - $\leq 78.5\%$  verkningsgrad
  - Ickelinjär
- Klass C
  - Leder  $< 50\%$  av tiden
  - $< 100\%$
  - Väldigt icke linjär

Mattias Thorsell

25

# Fler förstärkarklasser

- Klass AB
  - Mellan 100 % av 50 % duty cycle
- Klass D
  - Switchad push-pull förstärkare
- Klass E
  - Switchad förstärkare med resonator
- Klass F/F<sup>1</sup>
  - Överstyrda förstärkare med harmonisk last

Mattias Thorsell

26

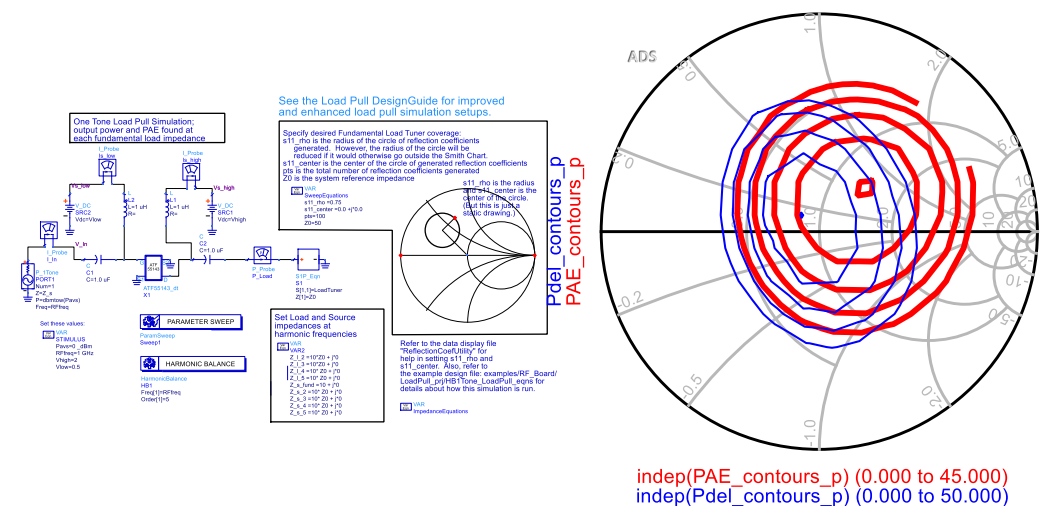
# Load-pull

- Uteffekt och verkningsgrad beror på  $\Gamma_L$
- Måste mätas med impedanstuners
  - Kan simuleras med icke linjär modell
- Konturer med konstant uteffekt och verkningsgrad fås
  - Motsvarar inte konstanta förstärkningscirklar
- Välj lämplig  $\Gamma_L$ 
  - Ingången anpassas sedan till  $\Gamma_{in}^*$

Mattias Thorsell

27

# Load-Pull konturer



Mattias Thorsell

28

## Design av effektförstärkare

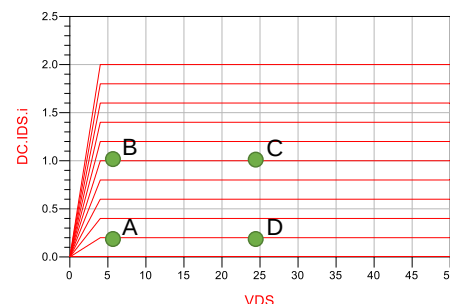
- Kontrollera stabilitet
  - Första approximation från S-parametrar
- Använd load-pull för val av  $\Gamma_L$ 
  - Maximera uteffekt
  - Maximera verkningsgrad
  - Bandbredd
- Konjugatanpassa ingången

## Sammanfattning förstärkar-design

- Välja transistor
  - Arbetspunkt
- Designa bias nät
- Stabilisering
- Designa anpassningsnät
  - Beror på tillämpning
  - Tänk på bandbredd

## Val av arbetspunkt

- A. Låg effekt och lågt brus
- B. Hög förstärkning och lågt brus
- C. Hög effekt (Klass A)
- D. Hög effekt och bra verkningsgrad (Klass AB, B)



## Sammanfattning: Förstärkare

- Max gain förstärkare
  - Simultan konjugatanpassning in/utgång
- Lågbrusförstärkare
  - Ingången för minimalt brus ( $\Gamma_S = \Gamma_{opt}$ )
  - Utgången för max förstärkning ( $\Gamma_L = \Gamma_{UT}^*$ )
  - Avvägning mellan gain/brus (använd cirklar)
- Effektförstärkare
  - Utgången för hög uteffekt och hög verkningsgrad
  - Ingången för max förstärkning ( $\Gamma_S = \Gamma_{IN}^*$ )

# Flerstegsförstärkare

- Varje steg består av transistor med anpassningsnät
- För mottagare optimeras första steget för minimalt brus och efterföljande steg optimeras för förstärkning
- För sändare optimeras första steget för förstärkning och sista steget för uteffekt/verkningsgrad

Mattias Thorsell

33



# Sammanfattning

- Vid stora in-signaler gäller inte S-parametrarna
  - Harmonic Balance i ADS
- Icke-linjär simulator nödvändig
- Effektförstärkare
  - Arbetspunkt avgör klass
  - Verkningsgrad viktigt
  - Load-pull mätningar/simuleringar nödvändiga
  - Sätter uteffekten för en sändare

Mattias Thorsell

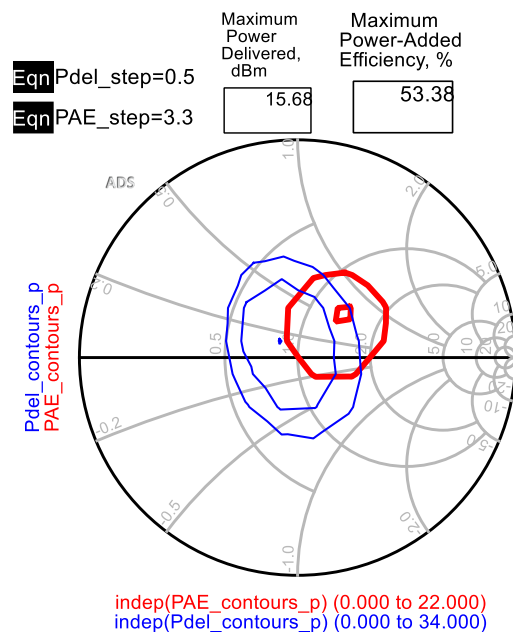
34



## Övning

- PAE > 50%
- Max uteffekt
- L-nät
- *S-parametrar* vid given in-effekt

$$S = \begin{bmatrix} 0.8 \angle -90^\circ & 0.01 \angle 0^\circ \\ 4 \angle 180^\circ & 0.7 \angle -90^\circ \end{bmatrix}$$



Mattias Thorsell

35



## Projektet

Mattias Thorsell

36



# Ickelinjära simuleringar

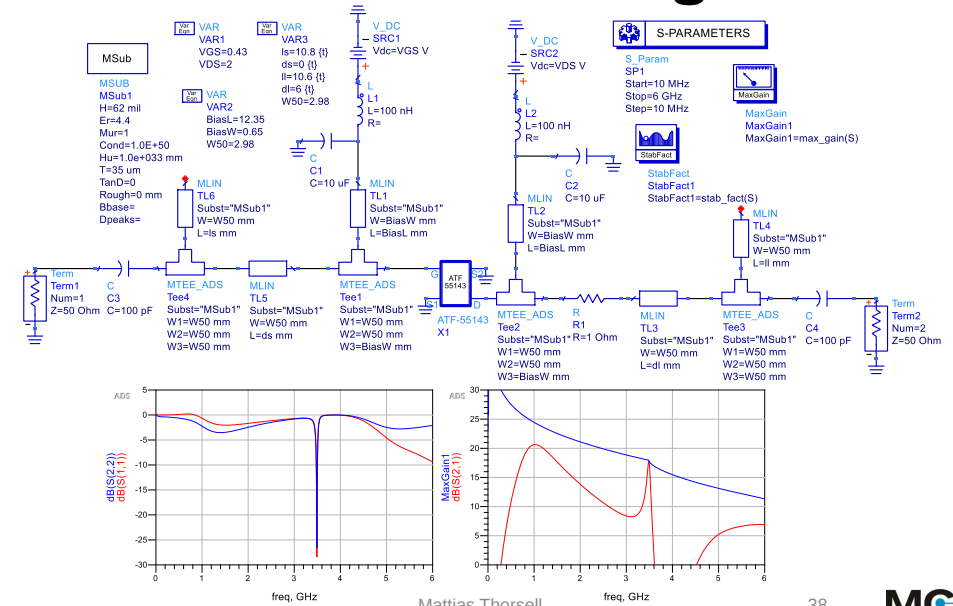
- Använd "Harmonic balance" simulatoren
- Simulera uteffekt mot ineffekt vid  $f_0$ 
  - Ta fram P1dB
  - Ta fram OIP3 utifrån 3e tonen
    - Gör inte två-tons simulering!
- Linjära simuleringar
  - DC (markera arbetspunkt)
  - S-parametrar (100% bandbredd)
  - Brus (100% bandbredd)

Mattias Thorsell

37



# Förstärkarsimulering



Mattias Thorsell

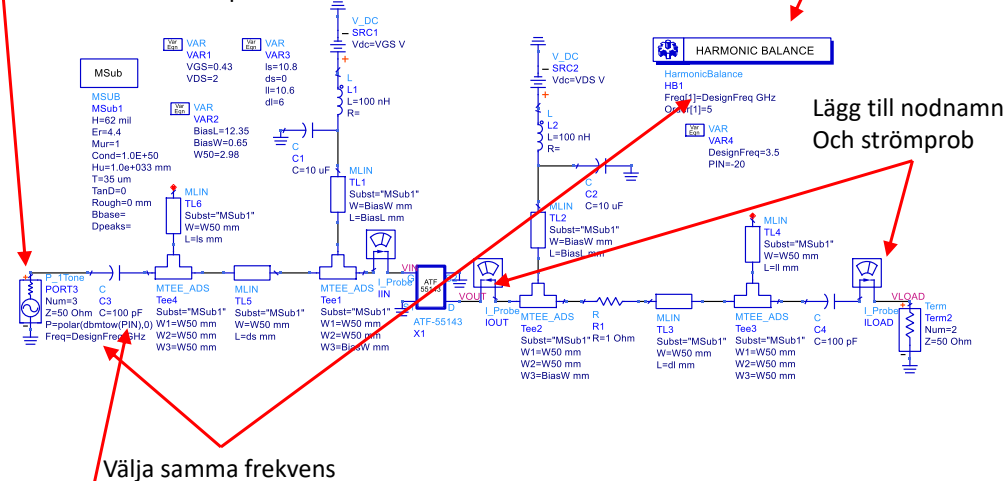
38



## Harmonic balance

Byt ut port 1 mot en källa.

Finns i "Sources Freq Domain"



Lägg in HB komponent

Lägg till nodnamn  
Och strömprob

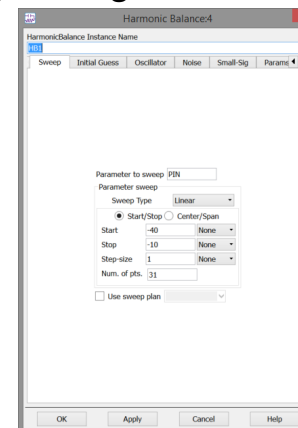
Välja samma frekvens

Inför variabel "PIN"

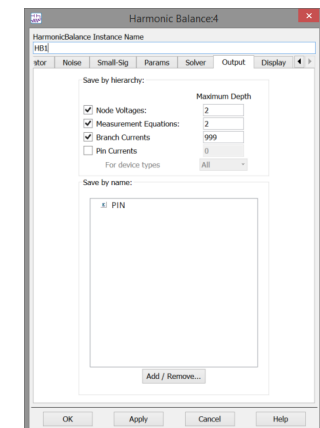


## Öppna HB komponent

Lägg in svep för PIN från  
låg till hög ineffekt



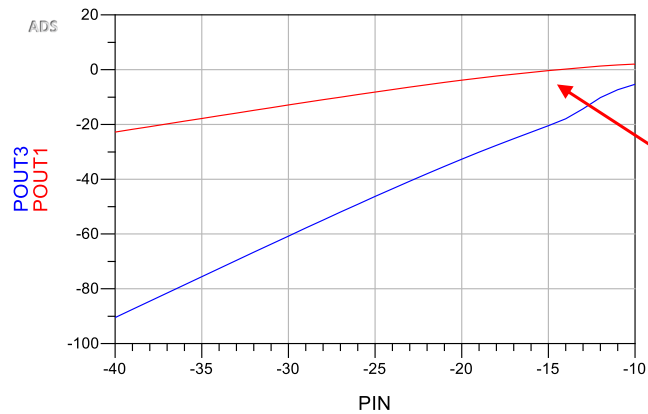
Lägg till PIN som Output  
variabel



# Linjäritet

$$\text{Eqn POUT1}=10*\log_{10}(\text{real}(\text{VLOAD}[1]*\text{conj}(\text{ILOAD.i}[1]))/2)+3$$

$$\text{Eqn POUT3}=10*\log_{10}(\text{real}(\text{VLOAD}[3]*\text{conj}(\text{ILOAD.i}[3]))/2)+3$$



Ta fram P1  
Och P3

# Vågformer (extra)

