



Technische  
Universität  
Braunschweig



LENA  
Laboratory  
for Energy  
Nanotechnology



Institut für  
Halbleitertechnik

**Grundlagen der Elektronik und Photonik**

**Kleinsignal-Parameter von Feldeffekt-Transistoren**

Prof. Dr. Andreas Waag

1

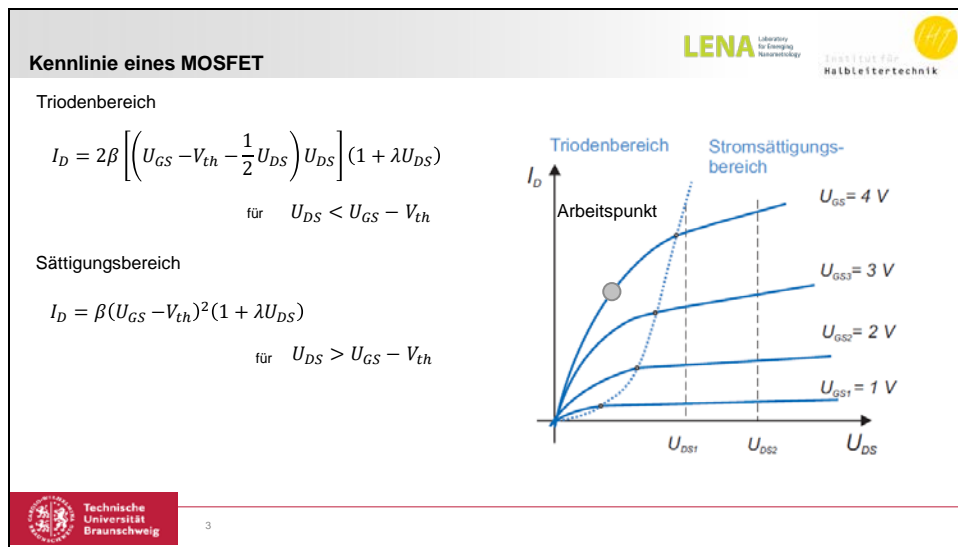
**Bänderschema von Halbleitern**

Die Inhalte dieses Clips entsprechen Level 3

- Level 1 Basiswissen Phase 1 (teilweise noch Schulwissen)
- Level 2 Basiswissen Phase 2 (Eingangskurse Bachelor)
- Level 3 Ziel-Niveau „Grundlagen der Elektronik und Photonik“
- Level 4 vertiefendes Wissen (Eingangskurse Master)
- Level 5 Expertenwissen (Fortgeschrittenen-Kurse Master)
- Level 6+ Wissensgrenze

Technische Universität Braunschweig

LENA Laboratory for Energy Nanotechnology  
INSTITUT FÜR Halbleitertechnik



Die Kennlinienfelder von MOSFETs sind stark nichtlinear. Der Drain-Strom durch den Kanal  $I_D$  ist nicht-linear abhängig von der Gate-Spannung  $U_{GS}$  und der Drain-Source-Spannung  $U_{DS}$ . Zur Dimensionierung von Schaltungen sind derartige Gleichungen recht unhandlich. Außerdem soll ein Transistor in einer Schaltung oft nur linear reagieren. So soll z.B. in einer Verstärkerschaltung der Ausgang möglichst linear, also proportional zum Eingangssignal sein. Nicht-Linearitäten machen sich als „Verzerrungen“ bemerkbar. Dies führt dazu, dass ein Transistor in einer Schaltung meist an einem festen Arbeitspunkt im Kennlinienfeld betrieben wird und nur kleine Abweichungen um diesen Arbeitspunkt herum im Betrieb zugelassen werden. Zur Beschreibung können die eigentlich nicht-linearen Kennlinien-Felder linearisiert werden: d.h. man entwickelt die Kennlinien-Funktion um einen Arbeitspunkt herum in einer Taylor-Reihe und bricht nach dem ersten linearen Term ab. Die so erhaltenden Parameter nennt man „Kleinsignal-Parameter“.

### Kleinsignal-Parameter eines MOSFETs

LENA  
Laboratory for Energy  
Nanotechnology
  
INSTITUT FÜR  
Halbleitertechnik

**Steilheit**

**Stromsättigungsbereich**

$$\beta = \frac{W}{2 \cdot L} \cdot K_P; \quad K_P = \frac{\epsilon_{OX}}{d_{OX}} \cdot \mu_n$$

$$S = g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{konst.}} \approx 2 \cdot \beta \cdot (U_{GS} - V_{Th}) \cdot (1 + \lambda \cdot U_{DS}) \quad (3.107)$$

$$= \sqrt{4 \cdot \beta \cdot (1 + \lambda \cdot U_{DS})} \cdot \sqrt{I_D} \approx \sqrt{4 \cdot \beta} \cdot \sqrt{I_D} \quad \text{für } U_{DS} \geq U_{GS} - V_{Th}$$

**Triodenbereich**

$$S = g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{konst.}} \approx 2 \cdot \beta \cdot U_{DS} \cdot (1 + \lambda \cdot U_{DS}) \quad U_{DS} < U_{GS} - V_{Th} \quad (3.108)$$

**Eingangswiderstand**

Der Eingangswiderstand eines Feldeffekt-Transistors ist sehr hoch, da über die Diode in Sperrrichtung praktisch kein Strom fließt.

Technische Universität Braunschweig

Die Kleinsignal-Parameter erhält man aus die Ableitung der Kennlinien an einem bestimmten Arbeitspunkt, der durch eine bestimmte Drain-Source-Spannung  $U_{DS}$  oder Gate-Spannung  $U_{GS}$  gekennzeichnet ist. Die jeweiligen Ableitungen an einem festen Arbeitspunkt  $U_{DS} = \text{konst}$  ergeben direkt die Koeffizienten der linearen Näherung, also die Kleinsignal-Parameter. Da wir mit dem Triodenbereich und dem Sättigungsbereich zwei unterschiedliche Situationen vorliegen haben, die mit unterschiedlichen Gleichungen beschrieben werden, ergeben sich auch 2 Sätze von Kleinsignal-Parameters für jeweils diese Bereiche.

Der erste Kleinsignal-Parameter ist die Steilheit  $S$ , die angibt wie stark sich der Drain-Strom als Funktion von  $U_{GS}$  ändert. Die Steilheit gibt also die Steuerwirkung des Transistors an. Je steiler diese Kurve ist, desto stärker wird sich der Drainstrom bei Variation der Gate-Spannung ändern. Die Steilheit ist abhängig von Arbeitspunkt, und damit von  $U_{GS}$  und  $U_{DS}$ .

Einfacher ist die Beschreibung des Eingangswiderstands: dieser ist sehr hoch, idealerweise unendlich, da über den Isolator unabhängig vom Gate-Potential kein Strom fließt.

### Kleinsignal-Parameter eines MOSFETs

**Ausgangsleitwert**

**Sättigungsbereich**


$$\frac{1}{r_{DS}} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \right|_{U_{GS}=\text{konst.}} = g_{DS} \approx \beta \cdot (U_{GS} - V_{Th})^2 \cdot \lambda \quad U_{DS} \geq U_{GS} - V_{Th} \quad (3.109)$$

**Triodenbereich**


$$\frac{1}{r_{DS}} = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} \right|_{U_{GS}=\text{konst.}} = g_{DS} \approx 2 \cdot \beta \cdot (U_{GS} - V_{Th} - U_{DS}) \quad U_{DS} < U_{GS} - V_{Th} \quad (3.110)$$

**Rückwirkungsleitwert**

$$g_r = \left( \left. \frac{\partial I_G}{\partial U_{DS}} \right|_{U_{GS}=\text{konst.}} \right) \quad (3.111)$$




LENA  
Laboratory for Energy  
Nanotechnology



INSTITUT FÜR  
Halbleitertechnik

Der Rückwirkungsleitwert beschreibt die Rückwirkung der Ausgangsspannung  $U_{DS}$  auf den Eingangsstrom  $I_G$ . Der Gate-Strom  $I_G$  ist allerdings bei Sperrschicht-FETs verschwindend klein, sodass auch der Rückwirkungsleitwert zumindest bei niedrigen Frequenzen vernachlässigt werden kann. Bei hohen Frequenzen muss allerdings die Gate-Kapazität berücksichtigt werden. Deren Umladung erzeugt mit steigender Frequenz auch zunehmend Verluste.



Technische  
Universität  
Braunschweig

Ein weiterer Kleinsignal-Parameter ist der Ausgangs-Leitwert. Dieser ergibt sich aus der Änderung des Drainstroms als Funktion der Drain-Strom-Spannung am Arbeitspunkt  $U_{GS}=\text{konst.}$  Wiederum ergeben sich 2 Gleichungen für den Sättigungsbereich und den Triodenbereich.

Der vierte Kleinsignal-Parameter ist der Rückwirkungsleitwert. Dieser gibt an, wie stark eine Änderung in  $U_{DS}$  auf den Eingangsstrom  $I_G$  zurückwirkt. Da  $I_G$  bei MOSFETs aber verschwindend klein ist, kann dieser Wert zumindest bei niedrigen Frequenzen vernachlässigt werden – es gibt keine Rückwirkung auf den Eingang. Bei hohen Frequenzen wird die Gate-Kapazität allerdings „durchsichtig“ und muss berücksichtigt werden.