

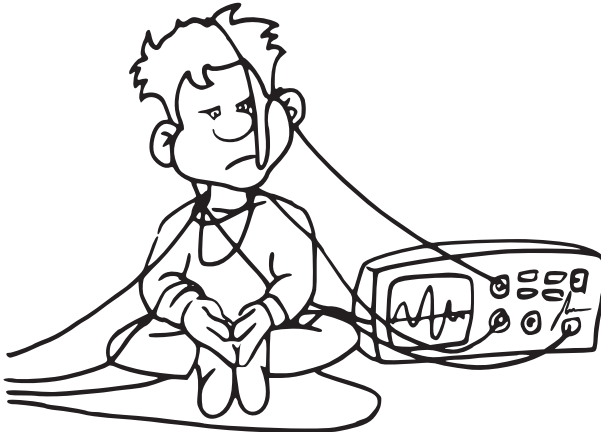
Grundlagen der Rechner-technologie

Sommersemester 2010 – 9. Vorlesung

Dr.-Ing. Wolfgang Heenes



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



1. Der Feldeffekt
2. Feldeffekttransistoren
3. CMOS
4. Zusammenfassung und Ausblick



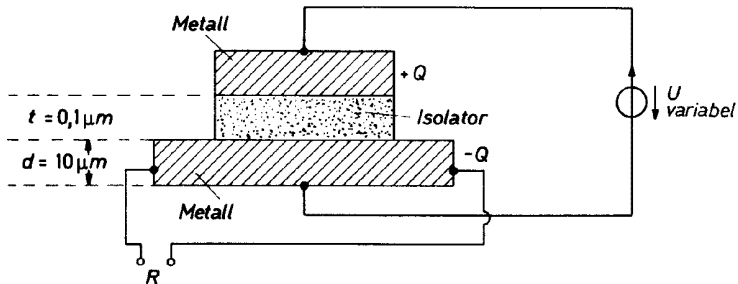
- ▶ Die Idee, mit Hilfe eines Feldeffekts ein elektronisch steuerbares Bauteil zu schaffen, ist schon sehr alt¹.
- ▶ Sie ist jedoch erst nach dem Aufbau einer hochentwickelten Halbleiter-Technologie durchführbar geworden.
- ▶ Grund dafür: In Leitern (Metallen) ist die Anzahl der freien Ladungsträger zu groß.
- ▶ Feldeffekt ist mit Leitern nicht nachweisbar.

¹J.E. Lilienfeld 1925, O. Heil 1934

Der Feldeffekt

Prinzip des spannungsgesteuerten Widerstands

- ▶ Betrachtet wird die folgende Anordnung, die aus zwei metallischen Streifen mit dünner isolierender Zwischenlage besteht.



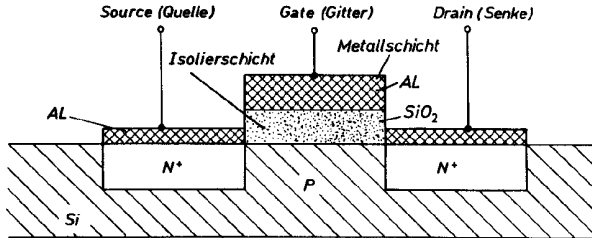
- ▶ Wenn an den beiden metallischen Streifen die als zwei Kondensatorplatten aufzufassen sind, eine Gleichspannung U anliegt, so werden sich entsprechend der Kapazität C und der Spannung U auf den Platten gegensätzliche elektrische Ladungsträger mit der Ladung $Q = C \cdot U$ ansammeln.
- ▶ Bei der gezeichneten Spannungspolarität werden auf dem oberen Streifen Elektronen verdrängt und auf dem unteren Streifen Elektronen angehäuft.
- ▶ Das bedeutet, dass unten die Menge an freien Ladungsträgern vergrößert wird.
- ▶ Im Prinzip sollte daher der Widerstand des unteren Streifens durch die Größe der Ladung Q und damit auch durch die Spannung U zu steuern sein.

- ▶ Berechnungen ergeben, dass man pro Volt eine zusätzliche Ladungsträgerkonzentration von etwa 10^{14} pro Kubikzentimeter erhält.
- ▶ Messungen der Konzentration an freien Ladungsträgern in Metallen führt auf etwa $10^{22} \cdot \text{cm}^{-3}$.
- ▶ Die Anreicherung an Elektronen in dem Metall ist daher unerheblich.
- ▶ Die Verhältnisse lassen sich aber ändern, wenn man statt Metallen Stoffe mit weniger freien Ladungsträgern heranzieht.
- ▶ Halbleiter haben etwa Konzentrationen von $10^{13} \cdot \text{cm}^{-3}$.
- ▶ In Halbleitern wird eine Ladungsvermehrung oder Verminderung zur Realisierung eines veränderbaren Widerstands technisch nutzbar.

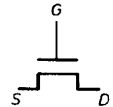
- ▶ Feldeffekttransistoren (FETs) sind Bauelemente, bei denen also ein Strom durch ein elektrisches Feld gesteuert wird.
- ▶ Feldeffekttransistoren werden auch Unipolartransistoren genannt, weil bei den FETs im Gegensatz zu den Bipolartransistoren nur Ladungsträger einer Polarität zum Strom beitragen.
- ▶ Nach Art der Wirkung des elektrischen Feldes unterscheidet man Sperrschicht- und Isolierschicht- Feldeffekt-Transistoren.
 - ▶ Sperrschicht-FET hat für die Digitalelektronik wenig Bedeutung (s. Jaeger, Richard: Microelectronic Circuit Design)
 - ▶ Isolierschicht-Feldeffekt-Transistoren
- ▶ Isolierschicht-Feldeffekt-Transistoren (MOSFETs) sind das häufigste Bauelement in integrierten Digitalschaltung

Prinzip des MOSFET

► Prinzip eines planaren Feldeffekttransistors (MOSFET²)

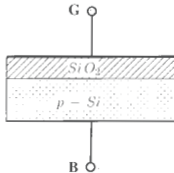


Symbol :

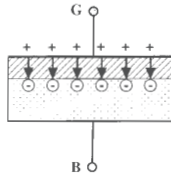


²Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor

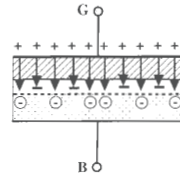
► Funktionsweise: Aufbau des MOSFET



a)



b)



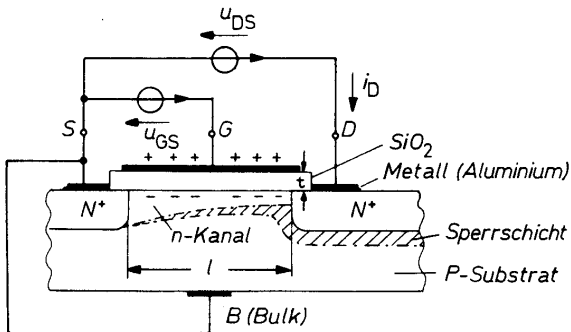
c)

- Wird an das Gate eine kleine positive Spannung gelegt, verursachen die positiven Ladungen auf dem Gate durch Influenzwirkung³ eine negative Ladungsanreicherung in einem schmalen Bereich, der an das Dielektrikum angrenzt.

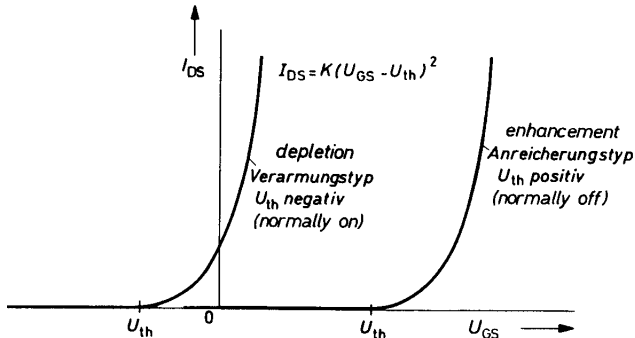
³Beeinflussung elektrischer Ladung durch elektrisches Feld

- ▶ An der Grenzschicht bilden sich bei höheren Spannungen freie Elektronen
- ▶ Durch das elektrische Feld ist im p-Halbleiter ein schmaler Bereich zur n-Schicht geworden.
- ▶ Es ist ein n-leitender schmaler Kanal entstanden.
- ▶ Da sozusagen eine Umkehr = Inversion des Ladungstyps stattgefunden hat, spricht man auch von einem Inversionskanal.

- Die Ausdehnung der Kanalzone ist in folgender Abbildung verdeutlicht.



- ▶ In folgender Abbildung ist die Eingangskennlinie $I_{DS} = f(U_{GS})$ abgebildet.

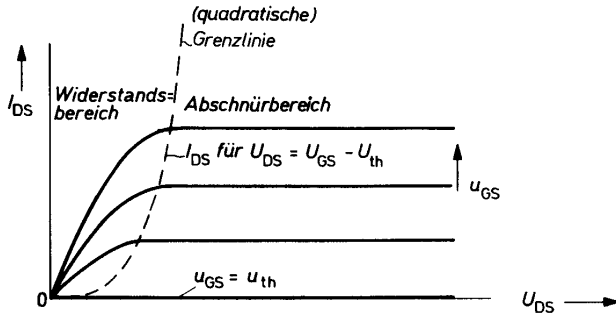




- ▶ Aus der Kennlinie ist zu sehen, dass es offenbar zwei Arten von Feldeffekttransistoren gibt.
- ▶ Anreicherungstyp: selbstsperrend
 - ▶ Will man ihn leitend machen, muß man den Kanalbereich mit negativen Ladungstypen anreichern, weshalb man diesen Typ *Anreicherungstyp* nennt.
 - ▶ es ist eine positive Gate-Source-Spannung notwendig, damit der Transistor leitet
- ▶ Verarmungstyp: selbstleitend
 - ▶ Nach Anlegen von U_{DS} fließt ein Strom. Dies wird durch eine schwache n-Dotierung erreicht.
 - ▶ Man kann diesen Transistor mit einer negativen Gatespannung sperren bzw. dadurch eine Verarmung an Ladungsträgern erzwingen, weshalb dieser Typ auch *Verarmungstyp* genannt wird.
 - ▶ Dieser MOSFET sperrt nur vollständig, wenn die Gatespannung negativ ist.
- ▶ Auch bei p-Kanal-Transistoren wird nochmal zwischen Anreicherungs- und Verarmungstyp unterschieden.

Kennlinien eines MOSFET

- Das Ausgangskennlinienfeld eines MOSFETs ist in folgender Abbildung dargestellt.



Betriebsbereiche eines MOSFETs

- ▶ Bei MOSFETs wird zwischen drei Betriebsbereichen unterschieden.

Betriebsbereich	$I_{DS} =$	$U_{GS} - U_{DS}$
Sperrbereich (Cutoff)	0	$U_{GS} < U_{TH}$
Anlaufbereich (Widerstandsbereich, Nonsaturation)	$K_N \left((U_{GS} - U_{TH}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right)$	$U_{GS} > U_{TH}$ $U_{GS} - U_{TH} \geq U_{DS}$
Abschnürbereich (Saturation)	$\frac{K_N}{2} \cdot (U_{GS} - U_{TH})^2$	$U_{GS} > U_{TH}$ $U_{GS} - U_{TH} \leq U_{DS}$



















- ▶ Erläuterungen:

- ▶ U_{TH} bezeichnet die Threshold-Spannung

- ▶ $K_N = \frac{\mu \cdot \epsilon}{t_{ox}} \cdot \frac{W}{L}$

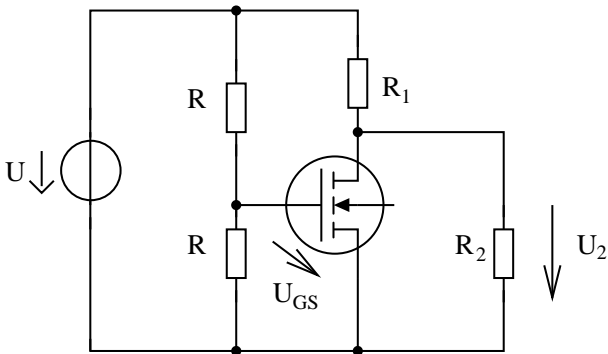
W und L beschreiben die Geometrie des Kanals. t_{ox} bezeichnet die Oxiddicke.

Übersicht über Feldeffekttransistoren

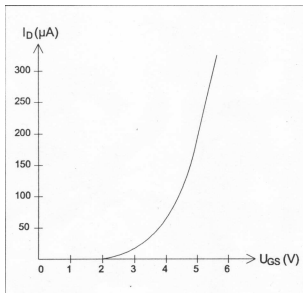
Fet					
Sperrschichtfet		Mosfet			
		Depletion - Mosfet		Enhancement - Mosfet	
n-Kanal	p-Kanal	n-Kanal	p-Kanal	n-Kanal	p-Kanal
					
					
					
diskrete Verstärker	diskrete Verstärker	diskrete Hochfrequenzverstärker	diskrete Hochfrequenzverstärker	diskrete Leistungsverstärker	diskrete Leistungsverstärker
analoge ICs	analoge ICs	digitale ICs	digitale ICs	digitale ICs	digitale ICs

Beispiel - Schaltung

- ▶ Gegeben ist die Schaltung in folgender Abbildung mit den Größen: $U = 10V$,
 $R_1 = R_2 = R = 10k\Omega$

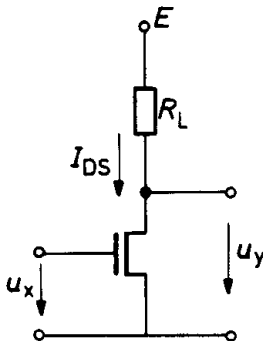


- ▶ Folgende Eingangskennlinie ist gegeben:



- ▶ Aufgaben:
 - Berechnen sie die Gatespannung U_{GS} .
 - Bestimmen sie den Drainstrom I_D aus der Übertragungskennlinie
 - Berechnen sie U_2 zuerst allgemein ($U_2 = f(U, I_D, R_1, R_2)$) und dann durch einsetzen der gegebenen Werte.

- ▶ In Analogie zu den Bipolar-Transistoren unterscheidet man *Source-*, *Drain-* und *Gateschaltung*, je nachdem, welcher Anschluß auf konstantem Potential liegt.
- ▶ Im Folgenden wird eine Sourceschaltung betrachtet. Der MOSFET ist ein n-Kanal-Anreicherungstyp.

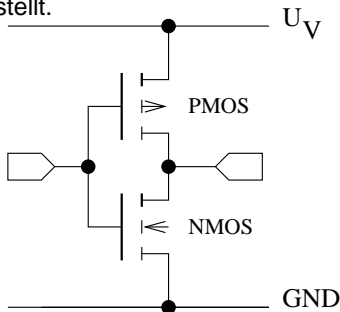




- ▶ Die Sourceschaltung entspricht der Emitterschaltung bei Bipolar-Transistoren. Der Unterschied besteht darin, dass der Eingangswiderstand sehr hoch ist und damit der Gatestrom I_{GS} vernachlässigbar klein ist.
- ▶ Für die Schaltung sind folgende Werte gegeben:
 - ▶ $U_{TH} = 1 \text{ Volt}$
 - ▶ $K_N = 25 \mu\text{A}/\text{V}^2$
 - ▶ $U_x = 3 \text{ Volt}$
 - ▶ $E = 10 \text{ Volt}$
 - ▶ $R_L = 100 \text{ k}\Omega$
- ▶ Berechnen Sie den Strom I_{DS} und die Spannung U_{DS} bzw. U_y . In welchem Betriebsbereich befindet sich der Transistor? Die Schaltung realisiert einen Inverter. Welchen Vorteil hat die Schaltung gegenüber einem Inverter mit einem Bipolar-Transistor?

- ▶ Durch die Isolierung des Gates ist der Eingangsstrom sehr gering. Man spricht bei MOSFETs auch von *spannungsgesteuerten Stromquellen*.
- ▶ In der Netzwerktheorie gibt es verschiedene sogenannte abhängige Quellen. Während ein Bipolartransistor als eine *stromgesteuerte Stromquelle* aufgefasst werden kann, so kann der MOSFET als *spannungsgesteuerte Stromquelle* angesehen werden.
- ▶ Man sollte sich klar machen, dass es sich dabei **wieder** um ein Modell handelt. In der Praxis ist der Gatestrom $\neq 0$ (z.B. μA -Bereich)
- ▶ Unterschiedliche Modelle möglich

- ▶ Eine Logikfamilie, die sich durch besonders niedrige Leistungsaufnahme auszeichnet, ist die CMOS-Logik⁴.
- ▶ CMOS-Logik hat in der praktischen Anwendung Logikgatter mit Bipolar-Transistoren weitgehend verdrängt. Die Schaltung eines Inverters ist in der Abbildung dargestellt.

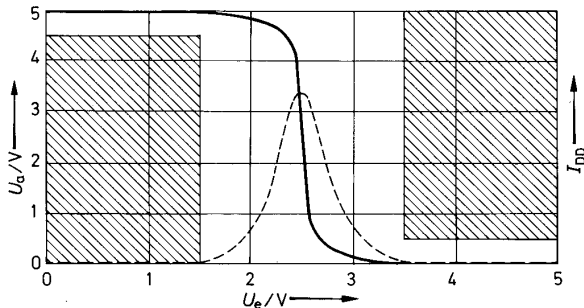


⁴Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor

CMOS-Technik

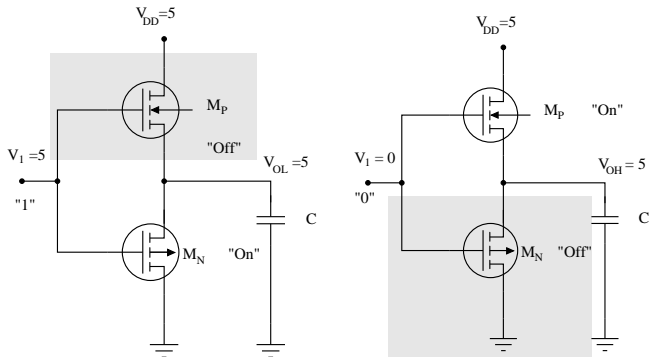
Übertragungskennlinie

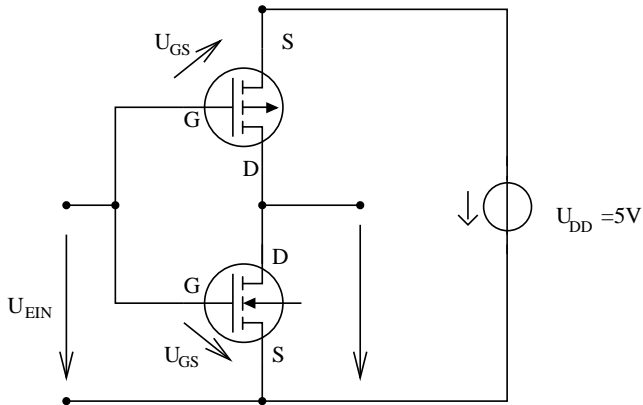
- ▶ Ist die Eingangsspannung $U_E = 0$ Volt, leitet der p-Kanal FET und der n-Kanal FET sperrt. Für $U_E = U_V$ sperrt der p-Kanal FET und der n-Kanal FET leitet.





- ▶ Die Stromaufnahme eines CMOS-Gatters setzt sich aus drei Anteilen zusammen:
 - ▶ Wenn die Eingangsspannung konstant gleich Null oder gleich U_V ist, fließt ein kleiner Sperrstrom im Bereich von wenigen Mikroamperé.
 - ▶ Wenn das Eingangssignal seinen Zustand wechselt, fließt vorübergehend ein Querstrom durch beide Transistoren.
 - ▶ Der überwiegende Beitrag entsteht bei der Auf- und Entladung der Transistorkapazitäten.
- ▶ Die Verlustleistung eines CMOS-Gatter ist $P_V = C_T \cdot U_D^2 \cdot f$. Dabei ist f die Transitionsfrequenz.





- ▶ Aus dem Kennlinienfeld kann man den Wert bzw. das Vorzeichen der Threshold-Spannung entnehmen. Für den **n-Kanal-Transistor** ergibt sich: $U_P(\text{bzw. } U_{THN}) = +0,75V$. Der Betrag von $0,75V$ ist willkürlich angegeben. Wichtig ist das **Vorzeichen**.
- ▶ Für den **p-Kanal-Transistor** ergibt sich: $U_P(\text{bzw. } U_{THP}) = -0,75V$. Der p-Kanal-Transistor besitzt also eine negative Threshold-Spannung.
- ▶ Warum der **p-Kanal-Transistor** bei einer Eingangsspannung $U_{EIN} = 0V$ leitet, kann man sich anhand des Maschenumlaufs überlegen.

$$U_{EIN} - U_{DD} - U_{GS} = 0$$

$$U_{EIN} = 0V$$

$$U_{GS} = -U_{DD}$$

$$U_{DD} \stackrel{!}{=} 5V$$

$$\underline{U_{GS} = -5V} \quad (\text{s. Kennlinie})$$

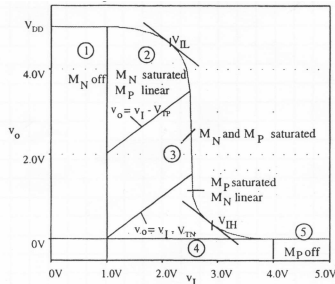
- Für den Fall, dass $U_{EIN} = 5V$ ist, ergibt sich:

$$U_{GS} = U_{EIN} - U_{DD} = 0$$

$$U_{GS} = 5V - 5V$$

$$\underline{U_{GS} = 0V}$$

- Damit sperrt der p-Kanal-Transistor.





- ▶ Feldeffekttransistoren

Nächste Vorlesung behandelt

- ▶ Vorbereitung drittes Labor