

# Elektronik 2

FS 24 Guido Keel (Michael Lehmann)

Autoren:

Authors

Version:

1.0.20240428

<https://github.com/P4ntomime/elektronik-2>

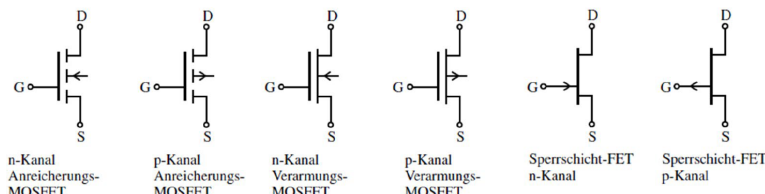


## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Feldeffekt-Transistoren</b>	<b>2</b>	<b>8 Lineare Spannungsregler</b>	<b>4</b>
1.1 FET-Typen und Symbole	2	8.1 Spannungsstabilisierung mit Z-Diode und BJT	4
1.2 Sperrschicht-FET / Junction FET (JFET)	2	8.2 Linearer Spannungsregler	4
1.3 MOS-FETs	2	8.3 Low-Dropout-Regler mit pnp-Längstransistor (LDO)	5
1.4 Verstärkerschaltungen mit FETs	2	8.4 Einstellbarer Serie-Spannungsregler	5
1.5 MOS-FET als (Leistungs-)Schalter	2	<b>9 Spannungswandler mit Ladungspumpen</b>	<b>5</b>
1.6 Transmission Gate	2	9.1 Grundprinzip Switched-Capacitor-Schaltungen (SC)	5
<b>2 Transistor-Transistor-Logik</b>	<b>2</b>	9.2 Grundprinzip Ladungspumpen	5
2.1 Resistor Transistor Logik (RTL)	2	9.3 Allgemeine Funktionsweise geschaltete Kapazitäten	5
2.2 Dioden-Transistor-Logik (DTL)	3	9.4 Spannungsinversion mit Switched Capacitors	5
2.3 Transistor-Transistor-Logik (TTL)	3	9.5 Spannungsverdoppler mit Switched Capacitors	5
<b>3 CMOS-Logik</b>	<b>3</b>	9.6 Dickson Charge Pump (Spannungsvervielfacher)	5
3.1 Grundgatter in CMOS-Logik	3	<b>10 Schaltregler</b>	<b>5</b>
3.2 Dualität NMOS - PMOS	3	10.1 Spannungswandler mit Spulen	5
3.3 Verlustleistung bei CMOS-Logik	3	10.2 Energien in den Komponenten	5
3.4 Verzögerungszeit	3	10.3 Aufwärtswandler (Boost, Step-Up Converter)	6
<b>4 Schmitt-Trigger</b>	<b>3</b>	10.4 Aufwärtswandler: Lückender Betrieb	6
4.1 Aufbau nichtinvertierender digitaler Schmitt-Trigger	3	10.5 Abwärtswandler (Buck, Step-Down Converter)	6
4.2 Aufbau invertierender digitaler Schmitt-Trigger	3	10.6 Invertierender Wandler (Buck-Boost Converter)	6
4.3 Schmitt-Trigger vs. CMOS-Logik	3	10.7 Flyback (Sperrwandler)	6
<b>5 Signalübertragung</b>	<b>3</b>	10.8 Power Fail Control (PFC)	6
5.1 Leitungstheorie	3	10.9 Aufbau Modernes Netzteil	6
5.2 Einfluss / Relevanz von Reflexionen	3	10.10 Fazit Spannungswandler SMPS	6
<b>6 High-Speed-Logik</b>	<b>3</b>	<b>11 Analoge Filter</b>	<b>6</b>
6.1 Emitter Coupled Logic (ECL)	3	11.1 Tiefpassfilter 1. Ordnung	6
6.2 Current Mode Logic (CML)	4	11.2 Bodeplot Tiefpassfilter 1. und 2. Ordnung	7
<b>7 Spannungsreferenzen</b>	<b>4</b>	11.3 Filter 2. Ordnung	7
7.1 Spannungsteiler	4	11.4 Filter höherer Ordnung	7
7.2 Diodenreferenz	4	11.5 Zeitverhalten: Schrittantwort	7
7.3 Spannungsreferenz mit mehreren Dioden	4	11.6 Schrittantworten verschiedener Polgüten	7
7.4 Spannungsreferenz mit Zenerdioden (Shunt-Regler)	4	11.7 Filter 2. Ordnung	7
7.5 Bootstrap-Referenz (VD Stromquelle)	4	11.8 Sallen-Key-Filter (Einfachmitkopplung)	7
7.6 Proportional To Absolute Temperature (PTAT)	4	11.9 Multiple-Feedback-Struktur	7
7.7 Bandgap-Spannungsreferenz	4	11.10 Sallen-Key vs. Multiple-Feedback Struktur	7
		11.11 Vorgehen: UTF aus OPV-Filterschaltung ermitteln	7
		11.12 Zustandsvariablen-Filter (Biquad-Filter)	7
		11.13 Analyse von Filterschaltungen mit Signalflussdiagrammen	8
		<b>12 Anhang</b>	<b>8</b>
		12.1 Temperaturabhängigkeit von Widerständen	8

# 1 Feldeffekt-Transistoren

## 1.1 FET-Typen und Symbole

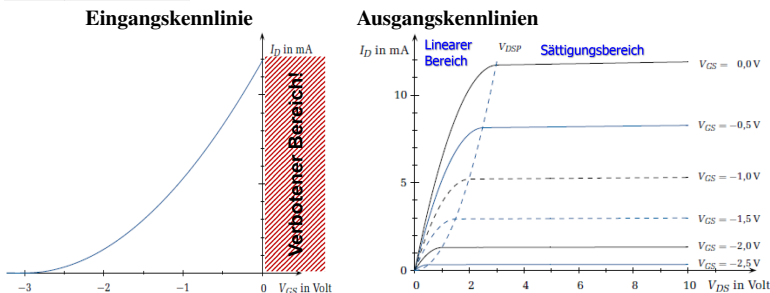


### 1.1.1 Anschlüsse eines FET

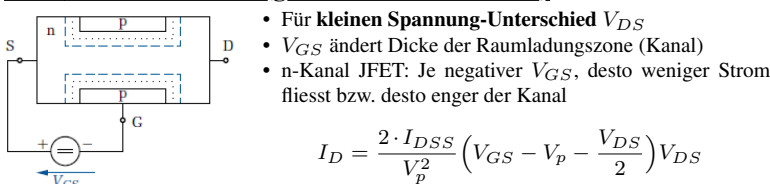
Kanal von Drain zu Source (Stromfluss), gesteuert von Gate (und Bulk)

## 1.2 Sperrschicht-FET / Junction FET (JFET)

### 1.2.1 Kennlinien

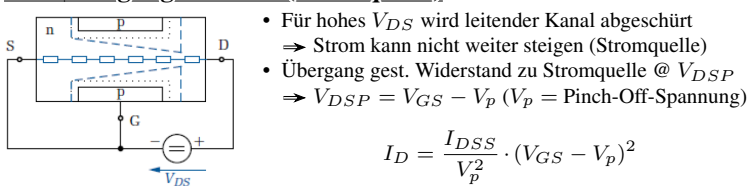


### 1.2.2 Linearer Bereich (gesteuerter Widerstand)



$$I_D = \frac{2 \cdot I_{DSS}}{V_p^2} \left( V_{GS} - V_p - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$$

### 1.2.3 Sättigungs-Bereich (Stromquelle)



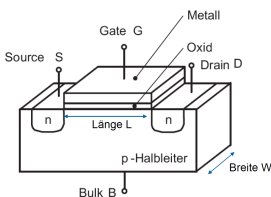
$$I_D = \frac{I_{DSS}}{V_p^2} \cdot (V_{GS} - V_p)^2$$

Verstärkungsmass Transkonduktanz:

$$g_m = \frac{2 \cdot I_{DSS}}{V_p^2} \cdot (V_{GS} - V_p) = \frac{2}{|V_p|} \cdot \sqrt{I_{DSS} \cdot I_D} \quad [g_m] = S$$

## 1.3 MOS-FETs

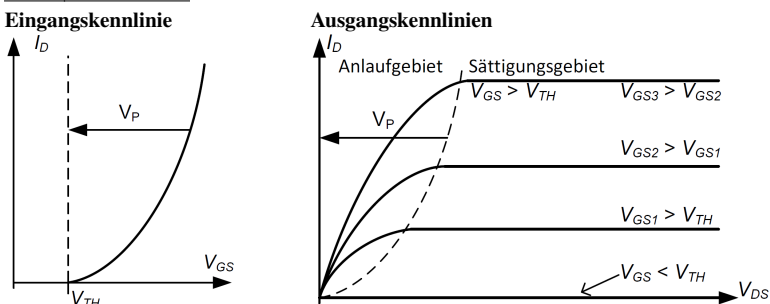
### 1.3.1 Aufbau



$L$  Länge des Transistors  
 $W$  Breite des Transistors

- N-Kanal FET: Drain und Source sind n-dotiert
- Kanal ist p-dotiert

### 1.3.2 Kennlinien



### 1.3.3 Bereiche

- Sperrbereich:  $V_{GS} < V_{TH}$
- Linearer (Widerstands-)Bereich / Anlaufbereich:  $V_{GS} > V_{TH}$
- Sättigungsbereich (Stromquelle):  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$

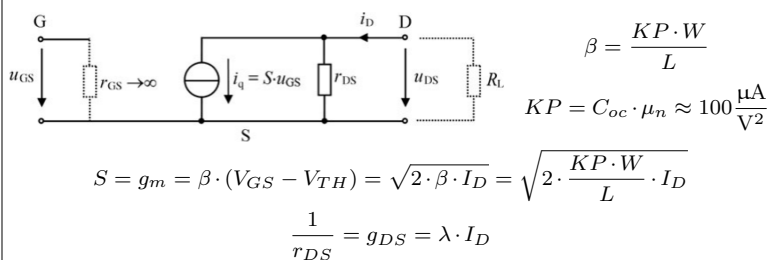
Anlaufbereich (Linearer Bereich)

Sättigungsbereich (Stromquelle)

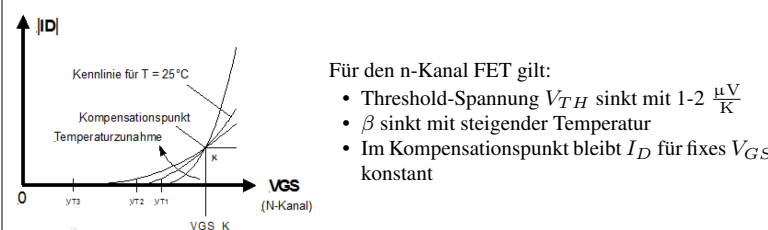
$$I_{D,lin} = \beta \cdot (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) \cdot V_{DS}$$

$$I_{D,sat} = \frac{\beta}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$

## 1.3.4 Kleinsignal-Ersatzschaltung (MOS-FET)



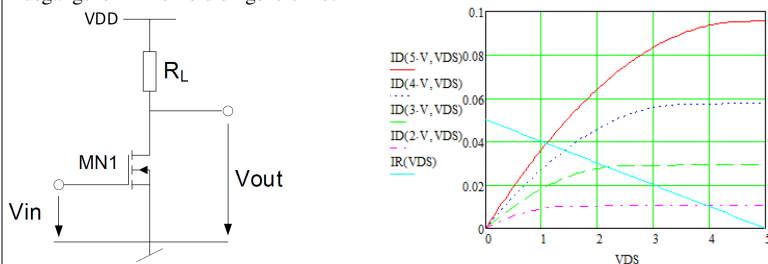
## 1.3.5 Temperaturabhängigkeit der Übertragungskennlinie



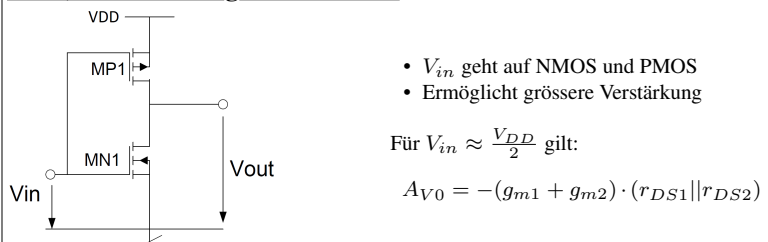
## 1.4 Verstärkerschaltungen mit FETs

### 1.4.1 Source-Schaltung mit Lastwiderstand

Um den Arbeitspunkt der Schaltung zu bestimmen, wird die Lastgerade von  $R_L$  in das Ausgangskennlinienfeld eingezeichnet



### 1.4.2 Push-Pull / Digitaler Inverter



## 1.5 MOS-FET als (Leistungs-)Schalter

Wenn der FET als Schalter eingesetzt wird, so arbeitet er im linearen Bereich ( $V_{GS} > V_{TH}$ , d.h.  $V_{out} < V_{DD} - V_{TH}$ )

$$I_{D,lin} = \beta \cdot (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) \cdot V_{DS} \quad r_{DS} = \frac{dV_{DS}}{dI_D} = \frac{1}{\beta \cdot (V_{GS} - V_{TH})}$$

Schalter geschlossen:  $R_{FET} = R_{DS(on)}$

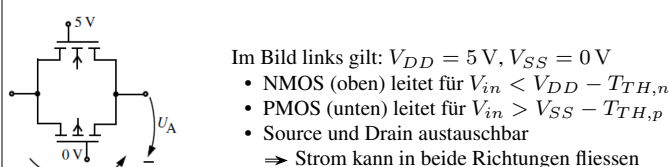
Schalter offen:  $R_{FET} = \infty$

### 1.5.1 Verlustleistung / Erwärmung

$$P_V = R_{DS} \cdot I_{DS}^2 = 0 W$$

$$\Delta T = R_{th} \cdot P_V$$

## 1.6 Transmission Gate



## 2 Transistor-Transistor-Logik

- Meist statischer Stromverbrauch
- Asymmetrische Schaltschwellen (weniger Marge als CMOS-Logik)

### 2.1 Resistor Transistor Logik (RTL)

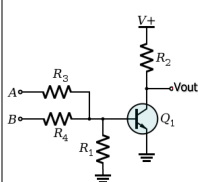


Bild: NOR-Gate

- Ausgangsspannung  $V_{out} = V_+$  oder  $V_{out} = V_{CE,sat}$
- Fan-Out ist begrenzt (Werden zu viele weitere Gatter an den Ausgang gehängt, so reicht der Strom nicht mehr, um diese zu treiben ⇒ Spannungslevel stimmen nicht mehr, um Transistoren durchzusteuern)

## 2.2 Dioden-Transistor-Logik (DTL)

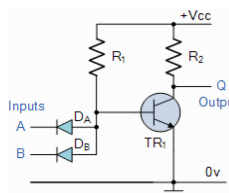
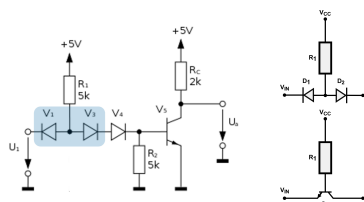


Bild: NAND-Gate

- **Fan-Out grösser**, da Transistor aktiv nach '0' zieht
- $R_2$  muss keine Gatter treiben (kein grosser Stromfluss)
- Nachteile: Sehr tiefer Störabstand; Transistor leitet schon bei Spannungen, welche kaum  $> 0\text{ V}$  sind

## 2.3 Transistor-Transistor-Logik (TTL)

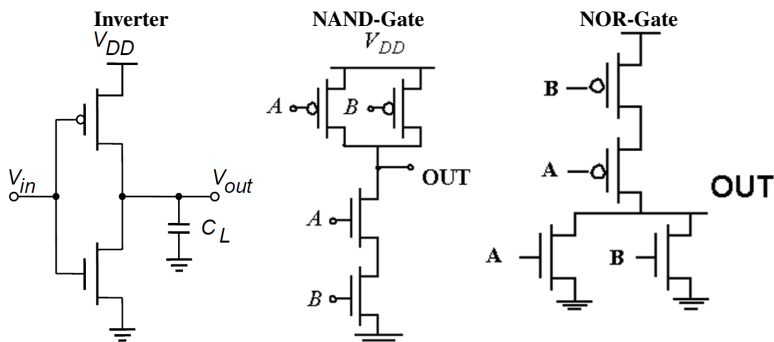


- Schaltschwelle am Eingang wird durch Dioden  $V_3$  und  $V_4$  um  $1.4\text{ V}$  erhöht
- Dioden  $V_1$  und  $V_3$  bilden npn-Struktur  $\Rightarrow$  npn-Transistor

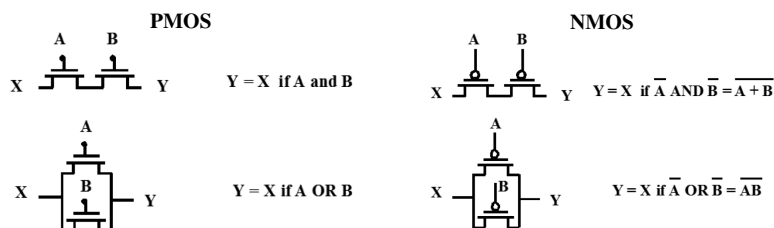
## 3 CMOS-Logik

- Entweder leitender Pfad nach  $V_{SS}$  (NMOS) oder  $V_{DD}$  (PMOS)
- Kein statischer Stromverbrauch
- Langsamer als Bipolar
- Symmetrische Schaltschwellen bei ca.  $\frac{V_{DD}}{2}$  (Übertragungskennlinie)
- Output-Level  $V_{ol}$ ,  $V_{oh}$  näher bei Speisung als Input Level  $V_{il}$ ,  $V_{ih}$   $\Rightarrow$  mehr Marge
- Höhere Speisespannung  $\Rightarrow$  weniger propagation delay
- Nicht geeignet zur Datenübertragung über längere Strecken (kein  $50\ \Omega$  Abschluss)

### 3.1 Grundgatter in CMOS-Logik



### 3.2 Dualität NMOS - PMOS



### 3.3 Verlustleistung bei CMOS-Logik

$$P_V = C \cdot V_{CC}^2 \cdot f$$

$C$  Kapazität (aus Datenblatt)  
 $f$  Frequenz

### 3.4 Verzögerungszeit

Linearer Bereich

$$t_{pHL} = 0.69 \cdot R_{on} \cdot C_L$$

$\Rightarrow$  Exponentielle Entladung!

Sättigung (Stromquellen-Bereich)

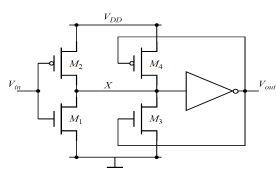
$$t_{pHL} = \frac{C_L \cdot \frac{V_{swing}}{2}}{I_{sat}} \approx \frac{C_L}{k_n \cdot V_{DD}}$$

$\Rightarrow$  Lineare Entladung!

## 4 Schmitt-Trigger

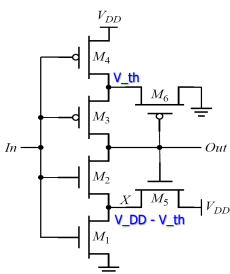
- Schaltschwellen müssen nicht sehr genau sein
- Schmitt-Trigger garantieren auch bei verrauschten Signalen saubere (einmalige) Schaltschwellen, dank der Hysterese

### 4.1 Aufbau nichtinvertierender digitaler Schmitt-Trigger



- $M_1, M_2$ : Digitale Inverter
- $M_3, M_4$ : gesteuerte Widerstände
- Für  $V_{out} = 0$ :  $M_4$  leitet,  $M_3$  sperrt
- Für  $V_{out} = 1$ :  $M_3$  leitet,  $M_4$  sperrt
- $M_3, M_4$  verschieben Schaltschwellen abhängig von  $V_{out} \Rightarrow$  Hysterese

## 4.2 Aufbau invertierender digitaler Schmitt-Trigger



- Ohne  $M_5, M_6$ : Normaler Inverter mit je 2 Serie-Transistoren
- Für  $V_{out} = 1$ : Durch  $M_5$  fliesst Strom in  $M_1$
- $V_{in}$  muss höher sein, um Strom der PMOS aufzunehmen  $\Rightarrow$  Höhere Schaltschwelle für High-Log-Übergang
- 'Inverses' gilt für  $M_6$  und  $M_4$

### 4.3 Schmitt-Trigger vs. CMOS-Logik

	Low Power	Noise Rejection	Supports Slow Inputs
Input Voltage Waveforms			
Standard CMOS Input			
Response Waveforms			
Schmitt-trigger CMOS Input			
Response Waveforms			

## 5 Signalübertragung

### 5.1 Leitungstheorie

- Leitungen haben Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten  $\Rightarrow$  RLC-Netzwerke
- **Fortpflanzungsgeschwindigkeit Signal**:  $v = 10 - 20\text{ cm/ns}$  (Lichtgeschwindigkeit:  $c = 0\text{ cm/ns}$ )
- Ev. **Impedanzanpassungen** zur Verhinderung von **Reflexionen** nötig (meistens  $50\ \Omega$ )
- CMOS-Logik: tiefen Quellenwiderstand, hohen Eingangswiderstand  $\Rightarrow$  Nicht geeignet zur Datenübertragung über 'längere Strecken'

### 5.2 Einfluss / Relevanz von Reflexionen

#### 5.2.1 Keine Reflexionen

Wenn nichts anderes bekannt gilt:  $T_r = \frac{1}{10} \cdot T$

$$T_d < \frac{1}{2} \cdot T_r$$

$T_r = T_f$  Anstiegs- / bzw. Abfallzeit des Signals  
 $T_d$  Laufzeit des Signals  
 $T$  Periodendauer

#### 5.2.2 Reflexionen

$$l > \frac{1 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{f_{max}}$$

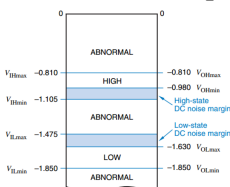
$f_{max}$  Maximal enthaltene Frequenz im Signal  
 $l$  Länge der Leitung

## 6 High-Speed-Logik

- Sättigung verhindern, da langsam (bei Bipolar-Transistoren)
- Reduzierter Spannungshub
- Stromsteuerung, da Ströme schneller geschaltet werden als Spannungen

### 6.1 Emitter Coupled Logic (ECL)

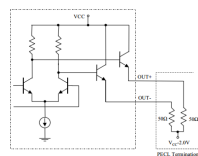
#### 6.1.1 Emitter Coupled Logic (ECL)



- 2 Familien: 10k (langsamer) und 100k (schneller)
- Positive Speisung:  $V_{CC} = 0\text{ V}$
- Negative Speisung:  $V_{EE} = -4.5\text{ V} / V_{EE} = -5.2\text{ V}$
- ICs werden warm ( $40\text{ mW}$  pro Gatter)

- Eingangssignal  $V_I$  wird mit fixer Referenz  $V_R$  verglichen
- Von  $V_R - 100\text{ mV}$  bis  $V_R + 100\text{ mV}$  **kippt Ausgangsspannung** von  $V_{CC}$  auf  $V_{CC} - R_C \cdot I_C$
- **Differentieller Spannungshub** der Ausgänge:  $V_{diff} = \pm R_C \cdot I_C$
- Spannungspegel **nicht** kompatibel zu CMOS / TTL

## 6.1.2 Positive Emitter Coupled Logic PECL

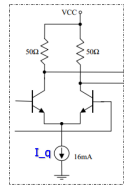


- Positive Speisung:  $V_{CC} = 5\text{ V}$
- Negative Speisung:  $V_{EE} = 0\text{ V}$
- Ausgangsbeschaltung mit  $50\ \Omega$  Abschluss zu  $V_{CC} - 2\text{ V}$   
 $\Rightarrow$  Reduktion der Reflexionen!
- Spannungsniveau sind kompatibel zu CMOS / TTL

## 6.1.3 Low Voltage Positive ECL (LVPECL)

- Speisespannungen:  $V_{CC} = 3.3\text{ V}$ ;  $V_{EE} = 0\text{ V}$
- Weniger Leistung als  $5\text{ V}$  Logik; leichter anpassbar an  $3.3\text{ V}$  Logik

## 6.2 Current Mode Logic (CML)



- Terminierung am Eingang der Folgestufe gegen  $V_{CC}$
- Äquivalenter Widerstand:  $R_{Ceq} = 50\ \Omega \parallel 50\ \Omega = 25\ \Omega$

$$\text{Differenzielle Spannung: } V_{diff} = \pm R_{Ceq} \cdot I_q$$

### 6.2.1 CML vs. ECL

ECL

CML

- Diff-Amp mit Transistor-Buffer; Ausgang am Emitter
- Single-ended Input (2. Eingang auf fixer Spannung)
- Single-ended Output (z.T. auch differentiell)
- Ausgang direkt vom Diff-Amp
- Differentieller Input und differentieller Output
- Impedanzanpassung zur Reduktion von Reflexionen ( $50\ \Omega$ )

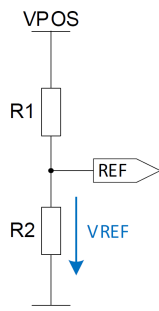
### 6.2.2 Vorteile / Nachteile von CML gegenüber CMOS-Logik

- + high Speed
- + konstanter Strom (kaum Speisungseinschränkung)
- + differentiell: wenig Störung
- + kann Kabel treiben
- hoher statischer Stromverbrauch
- differentiell: benötigt doppelt so viele Leitungen
- aufwändiges PCB-Layout wegen angepassten Leistungsimpedanzen nötig

## 7 Spannungsreferenzen

- Referenzspannungsquellen liefern idealerweise Ausgangsspannungen, welche **unabhängig** von Temperatur, Speisespannung und Last sind
- 2 Hauptprinzipien: Zenerdioden (meistens mit  $V_Z = 5.6\text{ V}$ ) und Bandgap-Quellen mit  $V_{out} = 1.25\text{ V}$

### 7.1 Spannungsteiler



#### Speisespannungsabhängigkeit

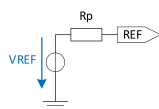
$$\text{Spannungsänderung: } \Delta V_{ref} = \Delta V_{POS} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Sensitivität: } \frac{V_{ref}}{V_{POS}} = \frac{\frac{\Delta V_{ref}}{\Delta V_{POS}}}{\frac{\Delta V_{POS}}{V_{POS}}} = 1 \Rightarrow \text{schlecht}$$

#### Temperaturabhängigkeit

Da die Widerstände **gleichen Temperaturkoeffizienten** haben ändert sich der Strom durch  $R_1$  und  $R_2$ , jedoch nicht das Widerstandsverhältnis  $\Rightarrow V_{ref}$  bleibt **konstant**  $\Rightarrow$  gut

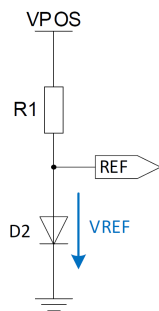
#### Spannungsänderung bei Lastwechsel



Ersatzschaltung der Referenzquelle durch Thévenin-Äquivalent mit

$$R_P = R_1 \parallel R_2 \Rightarrow \text{sehr lastabhängig, da } R_P \text{ gross}$$

### 7.2 Diodenreferenz



$$V_{ref} = V_D = n \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_S}\right) \text{ mit } V_T = \frac{kT}{q} \approx 25\text{ mV}$$

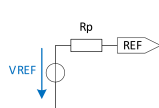
#### Speisespannungsabhängigkeit

$$\text{Sensitivität: } \frac{V_{ref}}{I} = \frac{1}{\ln\left(\frac{I}{I_S}\right)} = 0.065 \Rightarrow \text{gut}$$

#### Temperaturabhängigkeit

Diode hat einen **Temperaturkoeffizienten von  $-2\text{ mV/K}$** , d.h.  $V_{ref}$  ändert ebenfalls mit  $-2\text{ mV/K}$   $\Rightarrow$  schlecht

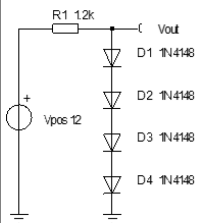
#### Spannungsänderung bei Lastwechsel



Diode durch Kleinsignal-Ersatzschaltung ersetzen und Ersatzschaltung der Referenzquelle durch Thévenin-Äquivalent mit

$$R_P = R_1 \parallel r_D \Rightarrow \text{weniger lastabhängig, da } r_D = \frac{n \cdot V_T}{I_D} \approx 7\ \Omega$$

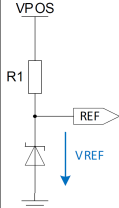
## 7.3 Spannungsreferenz mit mehreren Dioden



- $m = \text{Anzahl Dioden in Serie (links: } m = 4)$
- Strom durch Dioden muss  $> 0\text{ A}$  sein, damit  $V_D \approx 0.7\text{ V}$
- Spannung über  $m$  Dioden:  $V_{out} = m \cdot V_D$
- Max. Ausgangsstrom:  $I_{out,max} = \frac{V_{pos} - V_{out}}{R_1}$
- **Temperaturabhängigkeit:**  $TK_{tot} = m \cdot -2\text{ mV/K}$

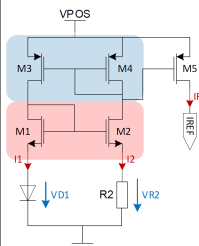
## 7.4 Spannungsreferenz mit Zenerdioden (Shunt-Regler)

**Shunt-Regler:** Überflüssiger Strom wird durch ein Element abgeführt  $\Rightarrow$  Je nach Last wird mehr oder weniger Strom in Z-Diode verheizt



- $V_{REF}$  entspricht Zener-Spannung der Z-Diode
- Häufigste Zener-Spannung:  $5.6\text{ V} \Rightarrow TK = 0\text{ mV/K}$
- Strom  $I = \frac{V_{POS} - V_{REF}}{R_1}$  fließt entweder durch Diode oder durch Last
- $I_{out} < I_{out,max} = \frac{V_{POS} - V_{REF}}{R_1}$

## 7.5 Bootstrap-Referenz ( $V_D$ Stromquelle)



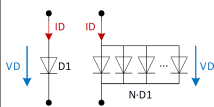
- Stromspiegel  $M_3$  und  $M_4 \Rightarrow I_1 = I_2$
- Stromspiegel  $M_1$  und  $M_2 \Rightarrow V_{GS1} = V_{GS2}$  da  $I_1 = I_2$
- Da Temperaturkoeffizient von  $V_{D1} \approx -2\text{ mV/K}$  nimmt  $I_{out}$  mit steigender Temperatur ab  $\Rightarrow$  schlechte Referenz
- Schaltung hat zwei mögliche Arbeitspunkte (AP  $I_1 = I_2 = 0$  ist unerwünscht!)

$$V_{D1} = I_2 \cdot R_2 = V_{REF}$$

$$I_{REF} = I_1 = I_2$$

## 7.6 Proportional To Absolute Temperature (PTAT)

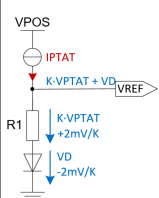
$$V_D = n \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right) \quad V_{DN} = n \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_D}{N \cdot I_S}\right)$$



$$\Delta V_D = V_D - V_{DN} = n \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln(N) = TK \cdot T$$

$\Rightarrow \Delta V_T$  ist Proportional zur absoluten Temperatur  $T$

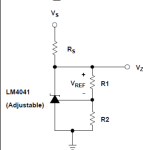
## 7.7 Bandgap-Spannungsreferenz



$$V_{REF} = K \cdot V_{PTAT} + V_D$$

- Der positive Temperaturkoeffizient von  $V_{PTAT}$  wird mit dem Faktor  $K$  verstärkt, sodass  $K \cdot TK_{PTAT} = +2\text{ mV/K}$
- Der nun positive Temperaturkoeffizient wird mit einer Diodenquelle mit  $TK_{Diode} = -2\text{ mV/K}$  kompensiert
- Der gesamte Temperaturkoeffizient  $TK_{bandgap} = 0\text{ mV/K}$
- $V_{REF}$  buffern, damit der Ausgang belastet werden darf

### Beispiel: LM4041 Shunt Voltage Bandgap Reference



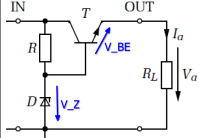
$$V_{out} = V_Z = V_{REF} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

- Einstellbare Referenzspannung  $V_Z = V_{out}$
- Interne Referenz:  $V_{REF} = 1.25\text{ V}$  (Bandgap-Referenz)

## 8 Lineare Spannungsregler

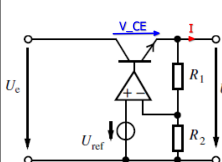
### 8.1 Spannungsstabilisierung mit Z-Diode und BJT

$$V_{out} = V_Z - V_{BE}$$



- Ausgang kann viel Strom liefern
- Ausgangsspannung **sinkt** um ca.  $20\text{ mV}$  bei **Verdoppelung** des Stroms
- Ausgangsspannung **sinkt** um  $-2\text{ mV/K}$
- **Keine Regelung** der Ausgangsspannung
- Schnell und stabil, aber nicht genau

### 8.2 Linearer Spannungsregler



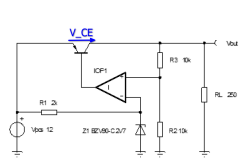
$$V_a = V_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$P_V = V_{CE} \cdot I$$

- OpAmp Ausgang ändert so lange, bis für die Spannungen gilt:  $V_{R2} = V_{ref}$  ( $= 1.25\text{ V}$ )
- Minimaler Spannungsabfall  $V_{CE}$  über Regler: bis  $2.5\text{ V}$
- Regler kann sehr warm werden  $\Rightarrow$  Verlustleistung  $P_V$

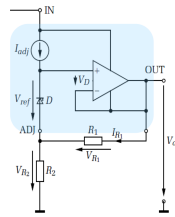


### 8.3 Low-Dropout-Regler mit pnp-Längstransistor (LDO)



- Feedback auf **positiven** OpAmp-Eingang!
- Ansteuerung Längstransistor mit Basisspannung  $< V_{out}$
- Kleiner minimaler Spannungsabfall  $V_{CE}$  über Regler ( $V_{CE,sat}$ )
- Auch erhältlich mit PMOS-Transistor statt pnp-Transistor  
 $\Rightarrow$  Dropout-Spannung über Regler (PMOS) ist dann abhängig vom Laststrom (PMOS = gesteuerter Widerstand)

### 8.4 Einstellbarer Serie-Spannungsregler



$$V_a = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} \cdot R_2$$

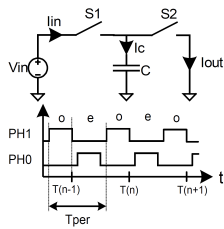
- Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  sind **extern** beschaltet!
- Interne Referenz:  $V_{ref} = 1.25 \text{ V}$  (Bandgap)
- OpAmp regelt, damit  $V_{R1} = V_{ref}$
- Damit wird  $V_{R2} = V_{ref} \cdot \frac{R_2}{R_1} + I_{adj} \cdot R_2$

### 9 Spannungswandler mit Ladungspumpen

- Ladung kann **nicht springen** und nicht vernichtet werden  
 $\Rightarrow$  Ladung wird umverteilt!
- Ladungspumpen sind billige, effiziente Spannungswandler (Wirkungsgrad  $> 99\%$  möglich)

$$Q = C \cdot V$$

#### 9.1 Grundprinzip Switched-Capacitor-Schaltungen (SC)



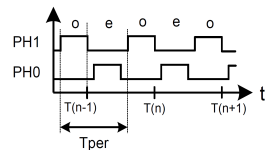
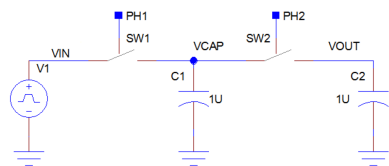
**Hinweis:**  $R_S$  entspricht dem Schalter-Widerstand  
 Weiter gilt:  $t^* = t - \frac{T}{2}$

Phase PH1 (S1 geschl.)  $I_{in} = I_C = \frac{V_{in}}{R_S} \cdot e^{\frac{t}{R_S \cdot C}}$

Phase PH2 (S2 geschl.)  $I_C = -I_{out} = -\frac{V_{in}}{R_S} \cdot e^{\frac{t^*}{R_S \cdot C}}$

Durchschnittl. Strom  $\bar{I}_{out} = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{C}{T} \cdot V_{in}$   
 Der 'switched capacitor'  $C$  hat einen **äquivalenten Widerstand**  $R_{eq} = \frac{T}{C} = \frac{1}{f \cdot C}$

#### 9.2 Grundprinzip Ladungspumpen

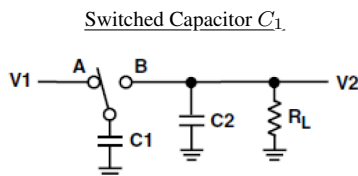


**Ausgangsspannung  $V_{out}$  nähert sich schrittweise exponentiell der Eingangsspannung an!**

Im ersten Zyklus ist  $V_{out} = 0 \text{ V}$

- Phase PH1 Kapazität  $C_1$  wird auf  $V_{in}$  geladen  
 $Q_1 = C_1 \cdot V_{in}$  und  $Q_2 = C_2 \cdot V_{out}$
- Phase PH2 Ladung **verschiebt** sich von  $C_1$  auf  $C_2$ , bis beide Kapazitäten dieselbe Spannung aufweisen  
 $Q_{tot} = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot V_{in} + C_2 \cdot V_{out}$   
 $\Rightarrow$  Neue Ausgangsspannung:  $V_{out} = \frac{Q_{tot}}{C_1 + C_2}$

#### 9.3 Allgemeine Funktionsweise geschaltete Kapazitäten

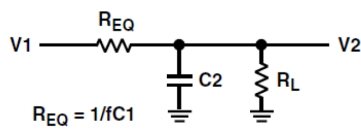


- Strom fließt in 'Paketen':  
 $\Delta Q = C_1 \cdot \Delta V$
- Durchschnittlicher Strom proportional zu  $C_1$ ,  $\Delta V$  und Schaltfrequenz  $f$

Für beide Schaltungen gilt, dass der **finale Wert der Ausgangsspannung  $V_{out} = V_2$**  durch den **Spannungsteiler** von  $R_L$  und  $R_{eq}$  bestimmt wird:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_L}{R_{eq} + R_L}$$

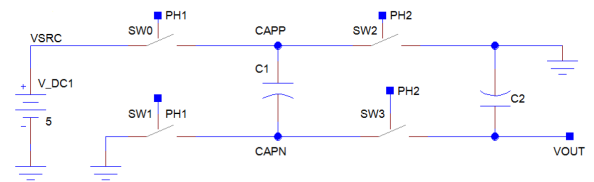
Ersatzschaltung mit  $R_{eq}$ .



- $R_{eq} = 1/fC_1$
- Durchschnittlicher Strom proportional zu  $\Delta V$  und  $\frac{1}{R}$
- Geschaltetes  $C_1$  bildet äquivalenten Widerstand  $R_{eq} = \frac{1}{f \cdot C_1} = \frac{T}{C}$

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_{eq}}$$

### 9.4 Spannungsinversion mit Switched Capacitors



**Ausgangsspannung  $V_{out}$  nähert sich schrittweise exponentiell  $-V_{SRC}$  an!**

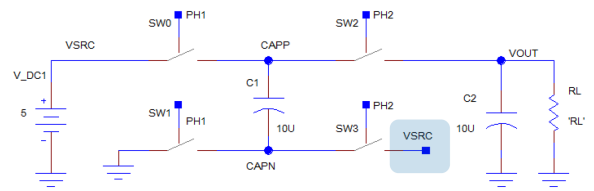
Im ersten Zyklus ist  $V_{out} = 0 \text{ V}$

- Phase PH1 Kapazität  $C_1$  wird auf  $V_{SRC}$  geladen  
 $Q_1 = C_1 \cdot V_{SRC}$  und  $Q_2 = C_2 \cdot V_{out}$
- Phase PH2 Positiver Anschluss von  $C_1$  wird mit GND verbunden  
 $\Rightarrow$  Negativer Anschluss von  $C_1$  auf Potential  $-V_{SRC}$  Für  $C_1 = C_2$  an:  
 $Q_{tot} = Q_2 - Q_1 = C_2 \cdot V_{out} - C_1 \cdot V_{SRC}$   
 $\Rightarrow$  Neue Ausgangsspannung:  $V_{out} = \frac{Q_{tot}}{C_1 + C_2}$

dert sich die Ausgangsspannung  $V_{out}$  folgendermassen:

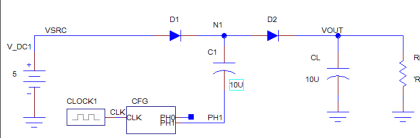
$$V_{out} = \left(-\frac{1}{2}, -\frac{3}{4}, -\frac{7}{8} \dots -1\right) \cdot V_{SRC}$$

### 9.5 Spannungsverdoppler mit Switched Capacitors



- PH1:  $C_1$  wird auf Eingangsspannung  $V_{in}$  aufgeladen
- PH2: Negativer Anschluss CAPN wird mit  $V_{SRC}$  verbunden  $\Rightarrow$  Positiver Anschluss  $C_1$  springt auf  $2 \cdot V_{SRC}$
- Ladung teilt sich zwischen  $C_1$  und  $C_2$  auf, sodass  $V_{out}$  schrittweise ansteigt

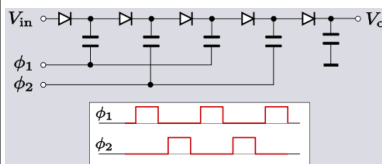
### 9.6 Dickson Charge Pump (Spannungsvervielfacher)



- Mehrstufige Spannungsvervielfacher (hier: einstufig)
- Anzahl Dioden  $n$
- Kaskadierung möglich

$$V_{out} = n \cdot (V_{SRC} - V_D)$$

#### 9.6.1 Mehrstufige Dickson Charge Pump



- Mehrstufige Spannungsvervielfacher (hier:  $n = 5$ )

$$V_{out} = n \cdot (V_{SRC} - V_D)$$

### 10 Schaltregler

SMPS (switched-mode-power-supply) sind getaktete Systeme, deren übliche Schaltfrequenzen im Bereich von 20 kHz bis zu einigen MHz liegen.

#### 10.1 Spannungswandler mit Spulen

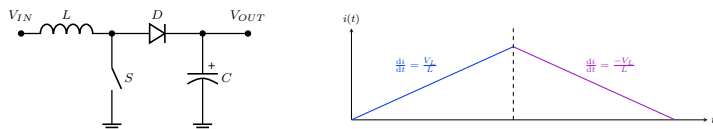
- Grundprinzip**
  - Energie wird an einer (Spannungs-)Quelle bezogen, in verlustarmen Elementen (**Spulen**, Kondensatoren) zwischengespeichert, auf die gewünschte Spannung gebracht und stabilisiert.
- Gemeinsamkeiten aller aufgeführten Spannungswandler mit Spulen**
  - Energie wird in Magnetfeld gespeichert  $E_L = \frac{1}{2} L \cdot i_L^2$
  - Spannung über Spule bewirkt Änderung des Stroms  
 $V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$  oder  $I_L = \frac{1}{L} \int V_L(t) dt + I_0 = \frac{V_L}{L} \cdot t + I_0$
  - Zur Stabilisierung der Spannung werden Kondensatoren benötigt (potentieller LC-Schwingkreis!)
  - Für die meisten Rechnungen kann man annehmen, dass:
    - $V_{in}$  und  $V_{out}$  **konstant** sind
    - Die **Schalter ideal** sind (kein Schaltwiderstand)
    - die **Dioden keinen Spannungsabfall** haben

**Hinweis:** Zur Steigerung der Effizienz werden Dioden manchmal durch MOS-FETs ersetzt ('nur'  $R_{DS,on}$  statt grosser Spannungsabfall). Die Schalter werden in der Praxis ebenfalls mit einem FET realisiert.

#### 10.2 Energien in den Komponenten

- Energie in Spule  $E_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_L^2$
- Energie in Kondensator  $E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_C^2$
- Energie in Last (pro Periode)  $E_{load} = \frac{1}{2} P_{load} \cdot T_{clk} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{out}^2}{R_{load}} \cdot T_{clk}$

## 10.3 Aufwärtswandler (Boost, Step-Up Converter)



### 1. Phase Energie in Spule speichern

- Schalter geschlossen
- $V_L = V_{in}$  liegt an Spule an
- $i_L$  muss nicht bei  $I_0 = 0$  starten!

### 2. Phase Entmagnetisierung

- Schalter offen
- Strom sinkt, wenn  $V_{out} > V_{in}$
- Eingeschwungener Zustand:  $i_L = I_0$

In beiden Phasen gelten die folgenden Formeln:

#### Ladephase

$$\Delta I_{L_{on}} = \frac{1}{L} \cdot V_{in} \cdot t_{on}$$

$$I_{L_{on}} = \frac{1}{L} \cdot V_{in} \cdot t_{on} + I_0$$

#### Entladephase

$$\Delta I_{L_{off}} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - V_{out}) \cdot t_{off}$$

$$I_{L_{off}} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - V_{out}) \cdot t_{off} + I_0$$

Gleichgewicht (eingeschwungen)

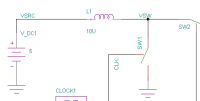
$$\Delta I_{L_{on}} = -\Delta I_{L_{off}}$$

Ausgangsspannung

$$V_{out} = V_{in} \cdot \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}}\right)$$

Die Ausgangsspannung  $V_{out}$  ist **abhängig von der Last**  $\Rightarrow$  Bei hochohmiger Last kann die Ausgangsspannung sehr gross werden!

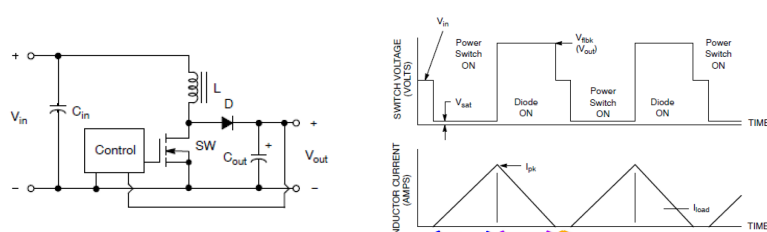
### 10.3.1 Synchronous Boost Converter



- Diode ersetzt durch Schalter SW2
- Entweder SW1 **oder** SW2 geschlossen
- VSW somit immer leitend verbunden, entweder mit GND oder mit  $V_{out}$
- $\Rightarrow$  In Spule fliesst immer ein Strom

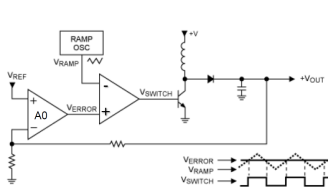
**Achtung:** Bei kleinen Lasten fliesst Strom in die Quelle zurück und die Verlustleistung in der Spule ist grösser (Drahtwiderstand)

## 10.4 Aufwärtswandler: Lückender Betrieb



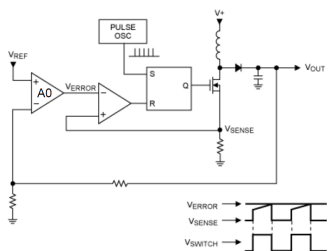
- Es existiert ein **3. Zustand**, in welchem kein Strom durch Spule fliesst
- Aus  $i_L = 0$  folgt  $V_L = 0$
- Schalter SW offen, damit Spannung am Knoten SW =  $V_{in}$  wird  $\Rightarrow$  Diode sperrt
- Control schliesst Schalter, nachdem  $V_{out} < V_{out,soll}$  ist  $\Rightarrow$  **Regelung** von  $V_{out}$

### 10.4.1 Regelung der Ausgangsspannung: voltage-mode control



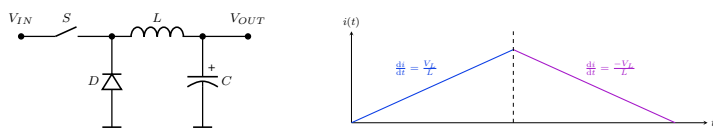
- Verstärker mit Verstärkung A0
- Komparator vergleicht  $V_{ERROR}$  mit  $V_{RAMP}$
- $V_{OUT} - V_{REF} \uparrow$ ,  $V_{ERROR} \uparrow$ , Schalter muss länger geschlossen bleiben  $\Rightarrow$  grösserer Duty Cycle  $\Rightarrow V_{OUT} \uparrow$

### 10.4.2 Regelung der Ausgangsspannung: current-mode control



- Strom wird mit Shunt-Widerstand durch Spannung  $V_{SENSE}$  gemessen
- Verstärker mit Verstärkung A0
- Komparator resettiert Flip-Flop  $\Rightarrow$  Schalter (FET) öffnet
- Häufiger zur Regelung verwendet als vorherige Schaltung

## 10.5 Abwärtswandler (Buck, Step-Down Converter)



**Vereinfachungen:**  $V_{out}$  konstant, kein Spannungsabfall über Diode und Schalter  
**Formeln gelten nur, wenn immer ein Strom in der Spule fliesst**

#### Ladephase

$$\Delta I_{L_{on}} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - V_{out}) \cdot t_{on}$$

$$I_{L_{on}} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - V_{out}) \cdot t_{on} + I_0$$

#### Entladephase

$$\Delta I_{L_{off}} = -\frac{1}{L} \cdot V_{out} \cdot t_{off}$$

$$I_{L_{off}} = -\frac{1}{L} \cdot V_{out} \cdot t_{off} + I_0$$

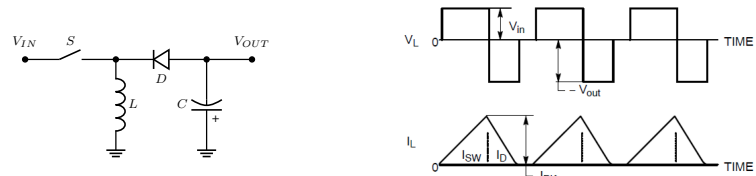
Gleichgewicht (eingeschwungen)

$$\Delta I_{L_{on}} = -\Delta I_{L_{off}}$$

Ausgangsspannung

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{t_{on}}{T}$$

## 10.6 Invertierender Wandler (Buck-Boost Converter)



**Der Converter kann im buck-mode oder boost-mode betrieben werden** buck-mode: Duty Cycle  $\frac{t_{on}}{T} < 0.5$ ; boost-mode: Duty Cycle  $\frac{t_{on}}{T} > 0.5$

#### Ladephase

$$\Delta I_{L_{on}} = \frac{1}{L} \cdot V_{in} \cdot t_{on}$$

#### Entladephase ( $V_{out} < 0$ )

$$\Delta I_{L_{off}} = \frac{1}{L} \cdot V_{out} \cdot t_{off}$$

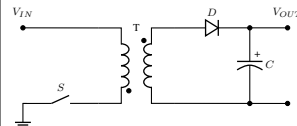
Gleichgewicht (eingeschwungen)

$$\Delta I_{L_{on}} = -\Delta I_{L_{off}}$$

Ausgangsspannung

$$V_{out} = -V_{in} \cdot \frac{t_{on}}{t_{off}}$$

## 10.7 Flyback (Sperrwandler)



- Ermöglicht **galvanische Trennung** zwischen Ein- und Ausgang
- Transformator mit grosser Induktivität nötig zur Energiespeicherung (mit Luftspalt)

#### • Phase 1 (Schalter geschlossen)

- Linear steigender Strom auf Primärseite; Energie wird im Magnetfeld gespeichert

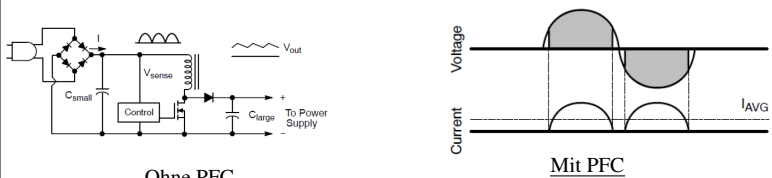
#### • Phase 2 (Schalter offen)

- Linear sinkender Strom auf Sekundärseite; Magnetfeld baut sich über Sekundärspule ab

#### • Phase 3 (LC-Schwingkreis)

- C parallel zu Schalter auf Primärseite wird wirksam

## 10.8 Power Fail Control (PFC)



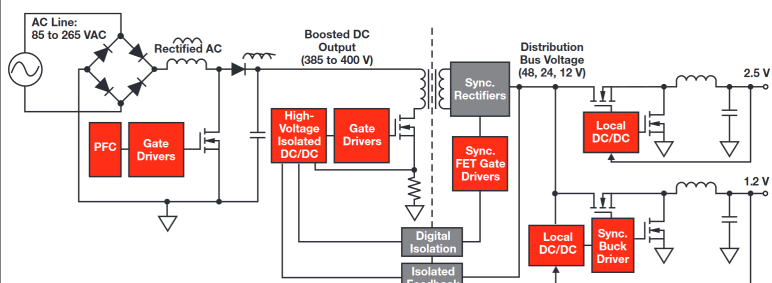
#### Ohne PFC

- Strom fliesst nur wenn  $V_{in} > V_C$  (nur bei Spannungsmaximum)
- $\Rightarrow$  erzeugt Oberwellen (Blindleistung)

#### Mit PFC

- Strom soll **möglichst sinusförmig** fließen, nicht nur beim Spannungsmaximum
- Lösung: 1. Stufe mit Boost Converter

## 10.9 Aufbau Modernes Netzteil



1. Stufe: Gleichrichtung und Boost Converter mit PFC
2. Stufe: Reduktion auf Systemspannung (Bus voltage) mit Flyback-Converter
3. Stufe: Buck Converter (ev. mehrere)

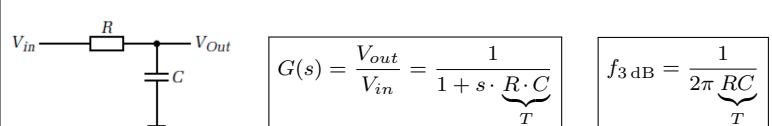
## 10.10 Fazit Spannungswandler SMPS

- Geschaltete Spannungsregler generieren weniger Verlustleistung als Linearregler
- Ausgangsspannung geschalteter Spannungsregler hat **Rippel** der Schaltfrequenz  $\Rightarrow$  Muss ev. mit Linearregler zusätzlich stabilisiert werden

## 11 Analoge Filter

- $f_{3dB}$  Cut-Off-Frequency, Corner-Frequency  
Dämpfung von 3 dB (d.h. Amplitude wird mit  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  'verstärkt'), Phase:  $-45^\circ$
- $f_S$  Sampling-Frequenz (ADC, digitale Filter)  
 $\Rightarrow$  Alle Frequenzen über  $\frac{f_S}{2}$  müssen unterdrückt werden
- UTF Übertragungsfunktion  $G(s)$

### 11.1 Tiefpassfilter 1. Ordnung



**Hinweis:** Die Zeitkonstante  $T$  entspricht immer dem Parameter vor dem  $s$ . Beim Tiefpass 1. Ordnung entspricht dies  $T = R \cdot C$

## 11.2 Bodeplot Tiefpassfilter 1. und 2. Ordnung

### 1. Ordnung

- Abfall von  $-20\text{dB/Dekade}$
- Phasenschiebung von maximal  $-90^\circ$  (bei  $f_g = -45^\circ$ )

### 2. Ordnung

- Abfall von  $-40\text{dB/Dekade}$
- Phasenschiebung von maximal  $-180^\circ$  (bei  $f_g = -90^\circ$ )

## 11.3 Filter 2. Ordnung

### 11.3.1 Kaskadierung von zwei gleichen Filtern

$$G_{11}(s) = \frac{1}{1+s \cdot \underbrace{R \cdot C}_{T_2}} \cdot \frac{1}{1+s \cdot \underbrace{R \cdot C}_{T_2}} \quad T_2 = \frac{\sqrt{2}-1}{2\pi f_{3\text{dB}}} \approx 0.64 \cdot T_1$$

Daraus folgt, dass bei 2 identischen Stufen die Grenzfrequenz  $f_{3\text{dB}}$  der einzelnen Stufen  $\frac{1}{0.64} = 1.56$  mal **höher** gewählt werden muss als bei einem Filter 1. Ordnung.

### 11.3.2 Filter 2. Ordnung mit komplexen Polen

$$G(s) = \frac{A_0 \cdot p_1 \cdot p_2}{(p_1 + s) \cdot (p_2 + s)} = \frac{A_0 \cdot \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad \begin{array}{l} p_i \text{ Polstellen} \\ \text{komplex für } Q > \frac{1}{2} \\ Q \text{ Polgüte / Filtergüte} \\ \omega_0 \text{ Polfrequenz} \end{array}$$

$$p_{1,2} = \frac{\omega_0}{2Q} (1 \pm \sqrt{1 - 4Q^2})$$

## 11.4 Filter höherer Ordnung

- Systeme höherer Ordnung können aufgeteilt werden in kaskadierte Teilsysteme 1. und 2. Ordnung
- Höhere Ordnung und komplexe Pole ermöglichen steileren Übergang zwischen Durchlass- und Sperrbereich

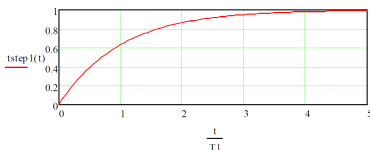
Folgende Filter erzielen durch unterschiedliche Polverteilungen unterschiedliches Verhalten:

- Butterworth:** Konstant im Durchlassbereich der UTF
- Bessel:** Beste Rechteckübertragung, kein Überschwingen
- Tschebyscheff:** Steilster Abfall im Sperrbereich der UTF

## 11.5 Zeitverhalten: Schrittantwort

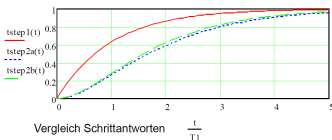
- Frequenzbereich: **Multiplikation** der UTF mit  $\frac{1}{s}$
- Rücktransformation in den Zeitbereich, um  $t_{step}(t)$  zu erhalten

### 11.5.1 Tiefpass 1. Ordnung



$$t_{step,1}(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_1}}$$

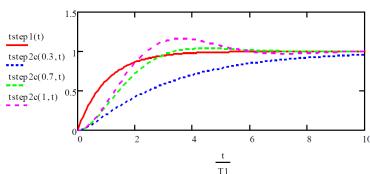
### 11.5.2 Tiefpass 2. Ordnung



$$t_{step2a}(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \cdot \left(1 + \frac{t}{T_1}\right)$$

$$t_{step2b}(t) = 1 - \left( \frac{T_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_1 - T_2} \right)$$

## 11.6 Schrittantworten verschiedener Polgüten



Komplexe Pole ( $Q > 0$ ) führt zu Überschwingern.  
Bei einer Polgüte von  $Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.7$  (grüne Krue) schwingt das System am schnellsten ein!

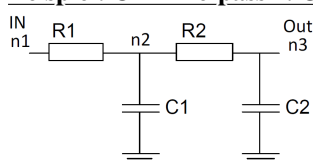
## 11.7 Filter 2. Ordnung

### Tiefpass

$$G(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A_0}{1 + \frac{1}{\omega_0 \cdot Q} s + \frac{1}{\omega_0^2} s^2}$$

Passive RC-Filter können maximal Güte 0.5 haben (entkoppelte reelle Pole). Filter höherer Güte benötigen entweder Spulen oder **Verstärker**.

### Beispiel: UTF Tiefpass 2. Ordnung

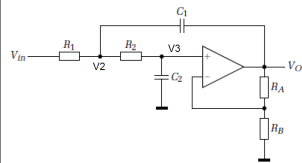


$$A_0 = 1 \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}{C_1 R_1 + C_2 R_1 + C_2 R_2}$$

$$G(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + (C_1 R_1 + C_2 R_1 + C_2 R_2) \cdot s + C_1 C_2 R_1 R_2 \cdot s^2}$$

## 11.8 Sallen-Key-Filter (Einfachmitkopplung)



$$\text{OpAmp: } V_{out} = G_0 \cdot V_3 = \left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right) \cdot V_3$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}{C_2 (R_1 + R_2) + C_1 R_1 \cdot (1 - G_0)}$$

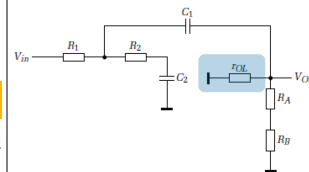
$$G(s) = \frac{G_0}{C_1 C_2 R_1 R_2 \cdot s^2 + [C_2 (R_1 + R_2) + C_1 R_1 (1 - G_0)] \cdot s + 1}$$

### Stromgleichungen:

$$V_2: 0 = (V_2 - V_{in}) \frac{1}{R_1} + (V_2 - V_3) \frac{1}{R_2} + (V_2 - V_{out}) \cdot s \cdot C_1$$

$$V_3: 0 = (V_3 - V_2) \frac{1}{R_2} + V_3 \cdot s \cdot C_2$$

### 11.8.1 Sallen-Key-Filter bei hohen Frequenzen

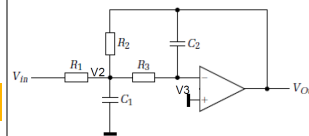


$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \frac{r_{OL}}{R_1 + r_{OL}}$$

$r_{OL}$  ist der OpAmp open-loop Ausgangswiderstand (bei hohen Frequenzen  $\approx 100 \Omega$ )

- Dämpfung ist limitiert auf obigen Spannungsteiler  $\Rightarrow$  Sallen-Key-Filter sind nicht geeignet für Systeme mit hohen Frequenzanteilen z.B. PWM-DAC

## 11.9 Multiple-Feedback-Struktur



$$\text{OpAmp: } G_0 = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$Q = \frac{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}{C_2 (R_2 + R_2 + R_3 \frac{R_2}{R_1})}$$

$$G(s) = \frac{G_0}{1 + C_2 (R_2 + R_2 + R_3 \frac{R_2}{R_1}) \cdot s + C_1 C_2 R_2 R_3 \cdot s^2}$$

### Stromgleichungen:

$$V_2: 0 = (V_2 - V_{in}) \frac{1}{R_1} + (V_2 - V_{out}) \frac{1}{R_2} + (V_2 - V_3) \frac{1}{R_3} + V_2 \cdot s \cdot C_1$$

$$V_3: 0 = (V_3 - V_2) \frac{1}{R_3} + (V_3 - V_{out}) \cdot s \cdot C_2$$

## 11.10 Sallen-Key vs. Multiple-Feedback Struktur

### Sallen-Key

- Nicht-invertierend
- $Q$  sensitiver auf Toleranzen
- Vorwärtspfad für hohe Frequenzen
- Noise-Gain:  $A$
- Eher für
  - Hochpass
  - kleine Verstärkungen

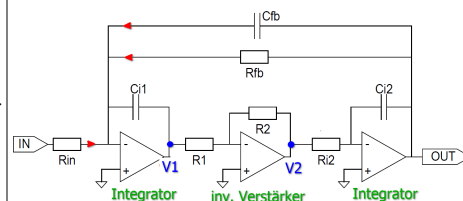
### Multiple-Feedback

- Invertierend
- $f_g$  sensitiver auf Toleranzen
- Noise-Gain:  $A + 1$
- Eher für
  - Tiefpass, Bandpass
  - grössere Verstärkungen

## 11.11 Vorgehen: UTF aus OPV-Filterschaltung ermitteln

- Stromgleichungen (Knotengleichungen) aufstellen
- Gleichungen ineinander einsetzen
- Umformen nach  $G(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}}$

## 11.12 Zustandsvariablen-Filter (Biquad-Filter)



Mit dieser Topologie sind alle drei Parameter  $f_0$ ,  $Q$  und  $A_0$  **frei wählbar!**  
An  $V_{out}$  herrscht **Tiefpass-Verhalten**.

$$G(s) = \frac{-\frac{R_{fb}}{R_{in}}}{s^2 \cdot C_{i1} C_{i2} R_{fb} R_{i2} \frac{R_1}{R_2} + s \cdot C_{fb} R_{fb} + 1}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_{i1} C_{i2} R_{fb} R_{i2} \frac{R_1}{R_2}}} \quad Q = \frac{1}{C_{fb}} \sqrt{C_{i1} C_{i2} \frac{R_1}{R_2 R_{fb}}} \quad A_0 = -\frac{R_{fb}}{R_{in}}$$

11.12.1 Allgemein: Filter mit mehreren OpAmps

Mit der Filter-Struktur aus Abschnitt 11.12 können auch Bandpass- und Hochpass-Filter gebildet werden:

- **Tiefpass:** Abgriff beim 3. OpAmp ( $V_{out}$  gemäss Abschnitt 11.12)
- **Bandpass:** Abgriff beim 2. OpAmp (an Knoten V2)
- **Hochpass:** Abgriff beim 2. OpAmp, Einspeisung am neg. Eingang des 2. OpAmps

11.13 Analyse von Filterschaltungen mit Signalfussdiagrammen

Aktive Filterschaltungen (mit OpAmps) können mittels Signalfussdiagrammen (SFDs) analysiert werden. Dazu wird die gesamte Schaltung in einzelne Komponenten aufgeteilt. Diese Komponenten werden dann mit Impedanz- bzw. Admittanzfunktionen abgebildet. Um die Übertragungsfunktion (UTF) der gesamten Schaltung zu erhalten, muss die **Regel von Mason** angewendet werden.

11.13.1 Eingangsadmittanzen / (Eingangsimpedanzen)

**Hinweis:** Es wird normalerweise mit Eingangsadmittanzen gearbeitet!

Komponente	Admittanz $Y$	(Impedanz $Z$ )
Widerstand $R$	$Y_{res} = \frac{1}{R}$	$(Z_{res} = R)$
Kapazität $C$	$Y_{cap} = s \cdot C$	$(Z_{cap} = \frac{1}{s \cdot C})$
Induktivität $L$	$Y_{ind} = \frac{1}{s \cdot L}$	$(Z_{ind} = s \cdot L)$

11.13.2 OpAmp Impedanzfunktionen

**Hinweis:** Es geht um negatives Feedback bzw. Gegenkopplung

Schaltung (Feedback)	Impedanz $Z$
Widerstand $R_f$ im Feedback	$Z_{op} = -R_f$
Kapazität $C_f$ im Feedback	$Z_{op} = -\frac{1}{s \cdot C_f}$
$R_f C_f$ (parallel) im Feedback	$Z_{op} = -\frac{R_f}{1 + s \cdot C_f \cdot R_f}$

Beispiel: Summierender Verstärker

$$V_{out} = Z_{op} \cdot (Y_0 \cdot V_{in0} + Y_1 \cdot V_{in1})$$
$$Y_0 = \frac{1}{R_0} \quad Y_1 = \frac{1}{R_1} \quad Z_{op} = -R_f$$

Beispiel: Aktiver Tiefpass 1. Ordnung

$$Y_{in} = \frac{1}{R_1} \quad Z_{op} = -\frac{R_f}{1 + s \cdot C_f \cdot R_f}$$
$$G(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = Y_{in} \cdot Z_{op} = -\frac{R_f}{1 + s \cdot C_f \cdot R_f} \cdot \frac{1}{R_1}$$

12 Anhang

12.1 Temperaturabhängigkeit von Widerständen

$R_{\vartheta} = R_{20} + \Delta R$	$R_{\vartheta}$	Widerstand bei Temperatur $\vartheta$	$[R_{\vartheta}] = \Omega$
	$R_{20}$	Widerstand bei 20 °C	$[R_{20}] = \Omega$
	$\alpha$	Temperaturkoeffizient	$[\alpha] = \frac{1}{K}$
$\Delta R = R_{20} \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta$	$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz $\vartheta - 20 \text{ °C}$	$[\Delta \vartheta] = \text{°C}$