

README

Beschreibung

Formelsammlung für Leistungselektronik 1 auf Grundlage der Vorlesung HS 16 von Prof. Dr.Jasmin Smajic
Bei Korrekturen oder Ergänzungen wendet euch an einen der Mitwirkenden.

OrCad

ORCAD Dateien und Simulationen zu den Übungen findet ihr auf OneDrive:

<https://1drv.ms/f/s!AigDIY3mrirZhqxYqS0gULPbaWLCfw>

Installation

- gehe zu \\hsr.ch\root\alg\software\Elektrotechnik\LeistEl\orcad16.6
- Rechtsklick auf ÖrcadSetup-starten-Run as administrator und Run as Administrator auswählen
- Orcad wird installiert
- Nach der Installation dem Hotfix-Link folgen und von dort aus den Hotfix installieren

Modulschlussprüfung

Prüfungsstoff ist der gesamte LeistEL-Vorlesungsinhalt des HS2016 einschliesslich aller UE + P Lerninhalte.
Als Hilfsmittel für die Modulschlussprüfung sind die Vorlesungen,
UE-Aufgaben und eigenen Praktikumsaufzeichnungen sowie der Taschenrechner erlaubt.

Plan und Lerninhalte

- Elektronische Schalter (Leistungshalbleiter) und passive Stromrichterkomponenten
- Aufbau und Arbeitsweise netzgeführter Stromrichter
- Wechsel- und Drehstromsteller
- Fremdgeführte Stromrichter
- Selbstgeführte Stromrichter
- Umrichter
- Steuerung und Regelung von Stromrichtern
- Einsatz von Stromrichtern in der Energietechnik
- Elektromagnetische Verträglichkeit und Netzrückwirkungen

Contributors

Luca Mazzoleni luca.mazzoleni@hsr.ch

License

Creative Commons BY-NC-SA 3.0

Sie dürfen:

- Das Werk bzw. den Inhalt vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen.
- Abwandlungen und Bearbeitungen des Werkes bzw. Inhaltes anfertigen.

Zu den folgenden Bedingungen:

- Namensnennung: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen.
- Keine kommerzielle Nutzung: Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden.
- Weitergabe unter gleichen Bedingungen: Wenn Sie das lizenzierte Werk bzw. den lizenzierten Inhalt bearbeiten oder in anderer Weise erkennbar als Grundlage für eigenes Schaffen verwenden, dürfen Sie die daraufhin neu entstandenen Werke bzw. Inhalte nur unter Verwendung von Lizenzbedingungen weitergeben, die mit denen dieses Lizenzvertrages identisch oder vergleichbar sind.

Weitere Details: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/ch/>

Leistungselektronik - Formelsammlung

Inhaltsverzeichnis

L. Mazzoleni

28. Dezember 2016

| | |
|--|-----------|
| 1 Halbleiter | 2 |
| 1.1 Kristallgitter | 2 |
| 1.2 Dotierung | 2 |
| 1.3 pn-Übergang | 2 |
| 2 Diode | 3 |
| 2.1 Ersatzschaltbild | 3 |
| 2.2 Grundformeln | 3 |
| 2.3 Schaltverhalten und Schaltverluste | 3 |
| 3 Transistor | 4 |
| 3.1 Bipolarer Transistor | 4 |
| 3.2 Darlington-Transistoren | 5 |
| 3.3 MOSFET | 5 |
| 3.4 IGBT | 5 |
| 3.5 Transistoren im Vergleich | 6 |
| 4 Thyristoren | 7 |
| 4.1 Thermische Eratzschaltung | 7 |
| 4.2 Abschaltbarer Thyristor | 7 |
| 4.3 IGCT | 7 |
| 5 Stromrichterschaltung | 8 |
| 5.1 Gruppierung | 8 |
| 5.2 Kennzeichnung | 8 |
| 6 Ungesteuerter Gleichrichter | 9 |
| 6.1 M1U | 9 |
| 6.2 B2U | 10 |
| 6.3 B6U | 10 |
| 6.4 Gesteuerte Gleichrichter | 11 |
| 6.5 Wechselstrom-Schalter/Steller | 12 |
| 7 Gleichstromumrichter | 13 |
| 7.1 Buck-Converter | 13 |
| 7.2 Boost-Converter | 13 |
| 7.3 Inverse-Converter | 14 |
| 7.4 Gleichstrom-Schalter/Steller | 14 |
| 8 Grundformeln | 15 |
| 8.1 Leistungen | 15 |
| 8.2 Fourier | 16 |
| 9 Lösen von Differentialgleichungen | 17 |
| 9.1 Allgemeine Vorgehensweisen | 17 |
| 9.2 Differentialgleichung 1. Ordnung | 17 |
| 10 Idiotenseite | 18 |

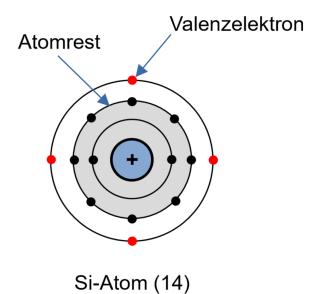
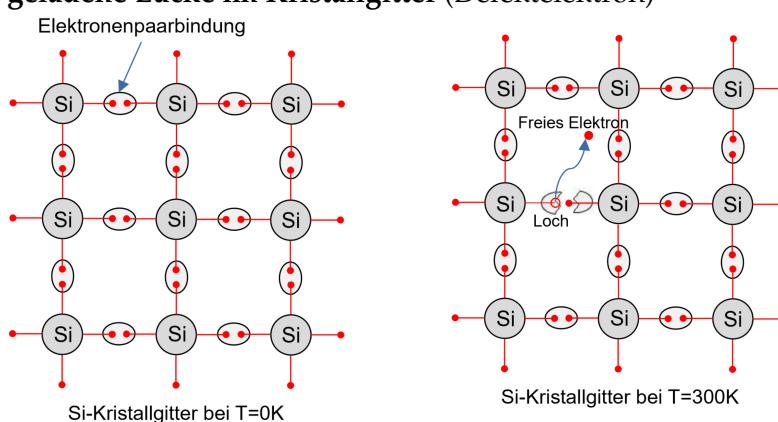
1 Halbleiter

- **Metallische Leiter:** der Stromtransport wird durch Elektronen erzeugt.
- **Isolatoren:** der Stromtransport wird durch Isolatoren erzeugt.
- **Halbleiter:** die Leitfähigkeit liegt irgendwo zwischen Metallen und Isolatoren.
Die wichtigsten Halbleiter sind Si, Ge, CuO₂ und GaAs
- **Dotierte Halbleiter:** Durch kontrollierte Verunreinigung (Dotierung) der reinen Halbleiterwerkstoffe kann die Leitfähigkeit wesentlich verändert werden.

1.1 Kristallgitter

Durch die thermische Bewegung der Atomem um ihre Ruhelage im Kristallgitter ist es möglich einige **Elektronenpaarbindungen** aufzubrechen.

Auf diese weise ein gelöstes Elektron bewegt sich im Kristallgitter frei und hinterlässt eine **positiv geladene Lücke im Kristallgitter** (Defektelektron)



1.2 Dotierung

Durch eine Dotierung des Halbleitermaterials mit Fremdatomen ist es möglich die Ladungsträgerdichte effizient zu kontrollieren:

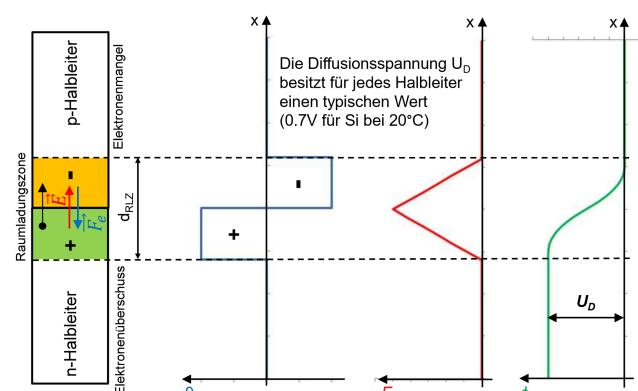
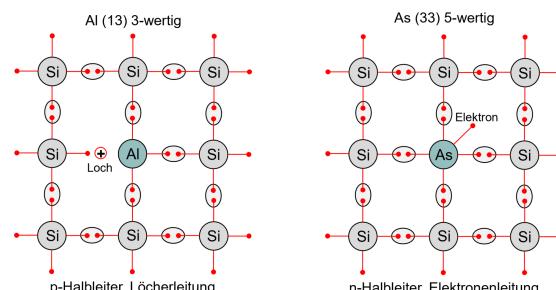
1.3 pn-Übergang

1.3.1 Diffusionsstrom

Der Diffusionsstrom wird durch den Ladungsträgeraustausch zwischen beiden Halbleitergebieten erzeugt und dadurch verschwinden in der Grenzschicht alle freien Ladungsträger.

Durch die Elektronenwanderung entsteht im n-Teil des Grenzgebiets die **ortsfeste** Positive Ladung(+). Die ein-diffundierten Elektronen erzeugen im p-Teil des Grenzgebiets die **ortsfeste** negative Ladung (-). Die ortsfesten Ladungen erzeugen das elektrische Feld in der Raumladungszone und dammit auch den Driftstrom.

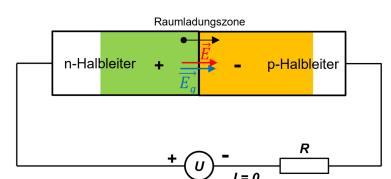
Der Driftstrom ist gegen den Diffusionsstrom gerichtet. Sobald die Ströme gleich sind, ist eine stabile Raumladungszone etabliert.



1.3.2 pn-Übergang mit äusserer Spannung

Die Spannungsquelle ist an den pn-Übergang in **Sperrrichtung** geschalten.

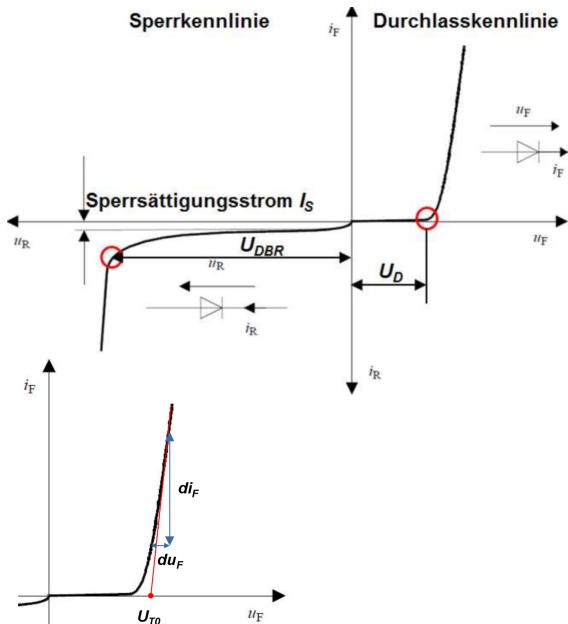
Die Spannung U vergrössert die Breite der Raumladungszone. Der Strom kann nicht über den pn-Übergang fliessen.



2 Diode

Eine Diode besteht aus PN Übergängen und ist deswegen ein nichtlineares Element:

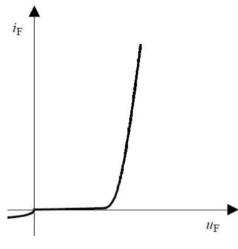
| | |
|-----------|---|
| U_{DBR} | Durchbruchspannung |
| U_D | Diffusionsspannung (0.7V Si) |
| U_F | Flussspannung |
| U_R | Sperrspannung |
| i_F | Diffusionsstrom, Strom in Durchlassrichtung |
| i_R | Leckstrom, Strom in Sperrichtung |



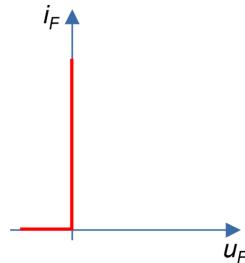
| | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| i_f, u_F | Durchlassrichtung |
| U_{T0} | Schwellenspannung |
| $r_f = \frac{dU_F}{di_F}$ | Differenzieller Durchlasswiderstand |

2.1 Ersatzschaltbild

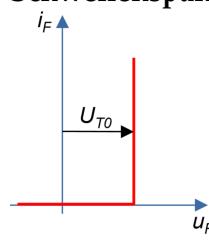
Reale Diode



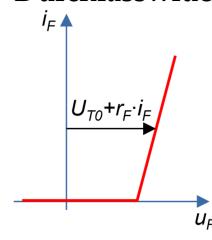
Ideale Diode (D_1)



Diode D_1 mit der Schwellenspannung D_2



Diode D_2 mit dem Durchlasswiderstand (D_3)



2.2 Grundformeln

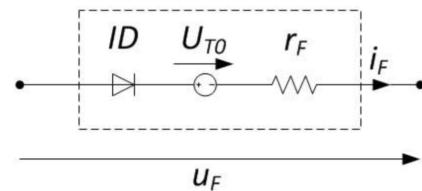
| | |
|------------------|---|
| Flussspannung | $u_F = U_{T0} + i_F \cdot r_F$ |
| Momentanleistung | $p(t) = u_F(t) \cdot i_F(t)$ |
| Verlustleistung | $P_v = U_{T0} \cdot I_{FAV} + r_F \cdot I_{FRMS}^2$ |
| I_{FAV} | arithmetische Mittelwert von i_F |
| I_{FRMS} | Effektivwert von i_F |

$$u_F = U_{T0} + i_F \cdot r_F$$

$$p(t) = u_F(t) \cdot i_F(t)$$

$$P_v = U_{T0} \cdot I_{FAV} + r_F \cdot I_{FRMS}^2$$

arithmetische Mittelwert von i_F
Effektivwert von i_F



2.3 Schaltverhalten und Schaltverluste

Durchlassverzug:

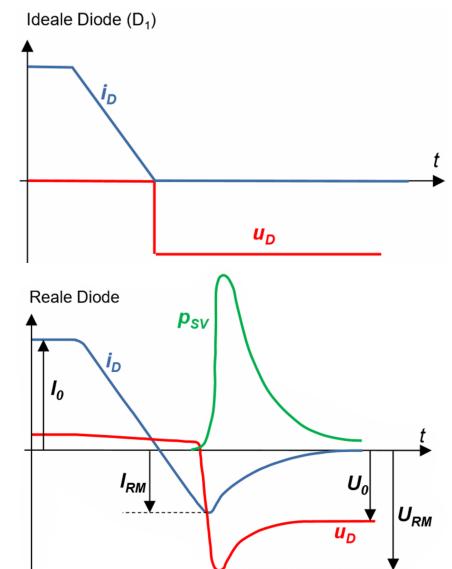
freie Ladungsträger müssen zuerst die Ladungsfrei Zone "füllen"

Sperrverzug

freie Ladungsträger müssen zuerst das Gebiet des pn-Überganges freiräumen

Diese Erscheinungen sind wichtig bei $\frac{du}{dt} > 100V/\mu s$ und $\frac{di}{dt} > 10A/\mu s$

| | |
|----------|------------------------------|
| I_{RM} | Maximalwert des Rückstroms |
| U_{RM} | Maximalwert der Rückspannung |



3 Transistor

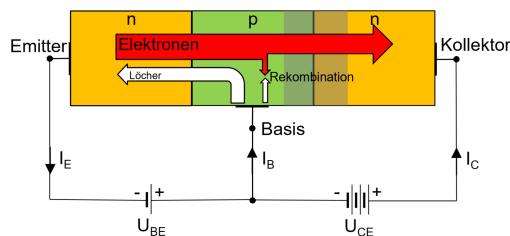
3.1 Bipolarer Transistor

3.1.1 Wirkungsprinzip

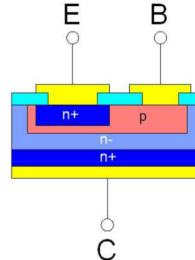
Ein Bipolartransistor besteht aus drei dünnen dotierten Halbleiterschichten, d.h. aus zwei pn-Übergängen. Gemäß der Reihenfolge und dem Dotierungstyp der Schichtung werden Bipolartransistoren in npn- und pnp-Typen unterteilt.

Als Leistungstransistoren werden überwiegend npn-Transistoren in der Emitter-Schaltung verwendet

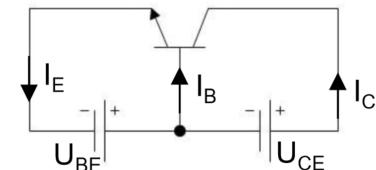
Wirkungsprinzip



Aufbau



Schaltzeichen



3.1.2 Schaltverhalten

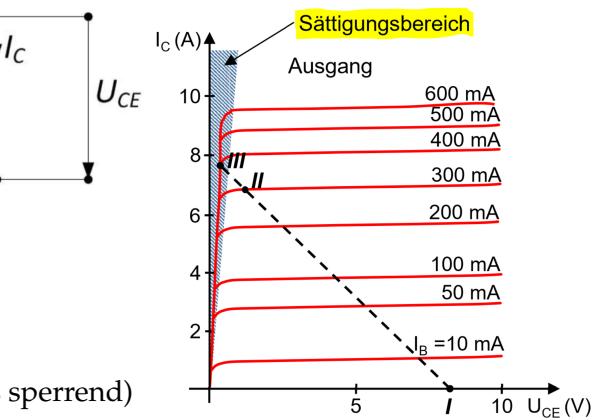
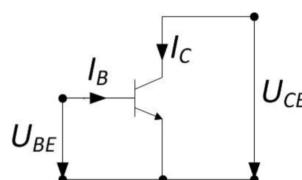
Im Sättigungsbereich ist

der Basisstrom so gross, dass sich in der Basiszone mehr Ladungsträger befinden als für den Kollektorstrom nötig ist.

Die beiden pn-Übergänge sind in die Durchlassrichtung polarisiert.
 $U_{BE} > U_{CE}$ und $U_{BC} > 0$

$$\text{Im Verstärkungsbereich gilt: } \beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Im Schaltbetrieb werden die Arbeitspunkte I (vorwärts sperrend) und III (Durchlassbetrieb -Sättigung) verwendet.

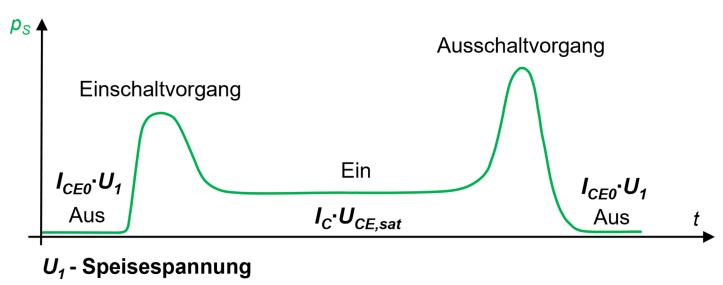
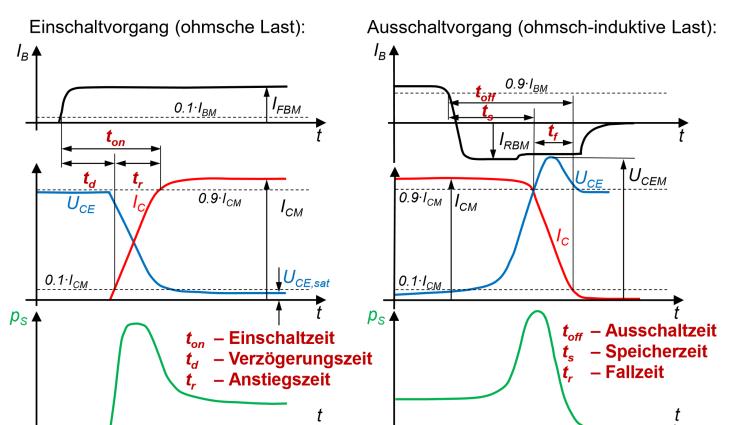


3.1.3 Kennwerte

| | |
|------------|--|
| U_{CES} | Kollektor-Emitter-Sperrspannung Der höchstzulässige Wert der U_{CES} bei Ansteuerung mit einer negativen U_{BE} |
| U_{CEO} | Kollektor-Emitter-Sperrspannung Der höchstzulässige Wert der U_{CE} bei offenem Basisanschluss |
| I_{CAVM} | Kollektor-Dauergrenzstrom Der höchstzulässige Wert des Gleichstrom-Mittelwerts bei vorgegebener Temperatur |
| I_{CRM} | periodischer Kollektor-Spitzenstrom der höchstzulässige Wert eines Pulstromes mit angegebener Periodendauer und Einschaltzeitdauer |

3.1.4 Verluste

- Einschaltverluste
- Ausschaltverluste
- Durchlassverluste
- Sperrverluste



3.2 Darlington-Transistoren

Der Stromverstärkungsfaktor der Leistungstransistoren ist relativ klein. Deswegen ist ein strarker Basisstrom für diese Transistoren notwendig. Ein Darlington-Transistor löst dieses Problem.

3.2.1 Formeln

β = Kleinsignalverstärkung

B = Grosssignalverstärkung

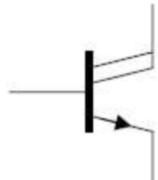
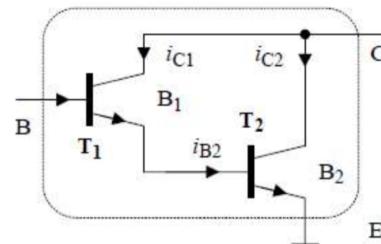
$$\beta_1 = \frac{i_{C1}}{i_{B1}} \quad \beta_2 = \frac{i_{C2}}{i_{B2}}$$

$$i_{E1} = i_{C1} + i_{B1} = (1 + \beta_1)i_{B1} = i_{B2}$$

$$i_{C2} = \beta_2 i_{B2} = \beta_2 i_{E1} = \beta_2(1 + \beta_1)i_{B1} = \beta_{ges} i_{B1}$$

$$\beta_{ges} = \beta_2(1 + \beta_1) \approx \beta_1 \beta_2$$

3.2.2 Aufbau



3.2.3 Vor und Nachteile

+ Gleichbleibender Platzbedarf, höhere Stromverstärkung

+ $B \approx B_1 \cdot B_2$ im Bereich <1000

+ $\beta \approx \beta_1 \cdot \beta_2$ im Bereich <50'000

- grosse Phasenverschiebung

- für Hochfrequenzanwendungen ungeeignet

- langsame Schaltzeiten

- doppelte Basis-Emitter-Spannung

Für effiziente Schaltanwendungen eignen sich Darlingtontransistoren wegen diesen Nachteilen kaum.

3.3 MOSFET

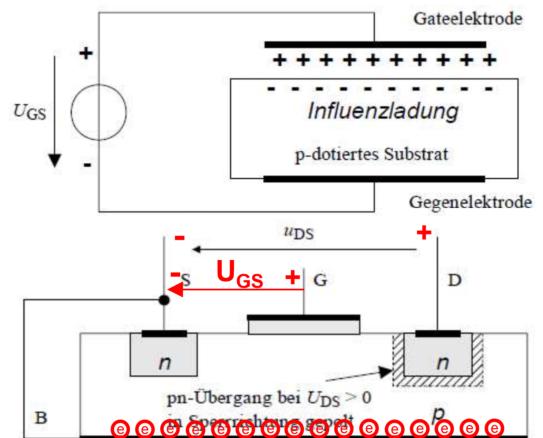
Die elektrische Leitfähigkeit des Substrats ist durch ein el. Feld gesteuert. Das el. Feld ruft im Substrat eine Influenzladung hervor.

Die Gate-Elektrode ist durch ein Metaloxid vom Substrat isoliert.
S = Source D = Drain
G = Gate B = Bulk(Substrat)

U_{DS} ist positiv damit ist der rechte pn-Übergang in Sperrrichtung gepolt. Deswegen kann kein Strom in beide Richtungen fließen.

→ Der Transistor ist selbstsperrend.

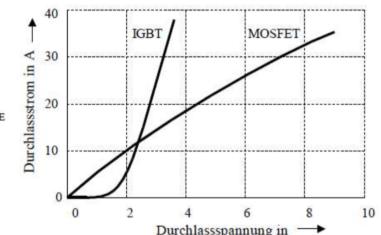
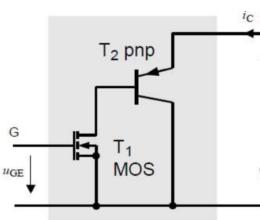
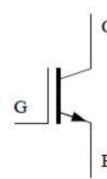
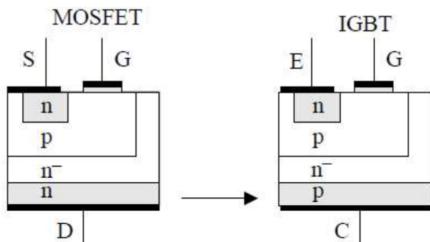
↑ Sobald eine positive Spannung zwischen G und S angelegt ist, entsteht ein leitfähiger n-Kanal und damit auch ein Strom vom D- zum S-Anschluss.



3.4 IGBT

Der IGBT setzt sich aus einem Bipolartransistor T_2 und einem MOSFET T_1 zusammen.

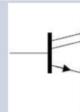
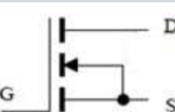
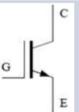
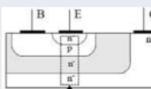
n- ist eine schwach dotierte Zone, welche zur Erhöhung der Spannungsfestigkeit verwendet wird.



3.4.1 Eigenschaften

- Über die Kollektor-Emitter-Strecke fällt mindestens die Schleusenspannung ab
- kleine Durchlassverluste bei hohen Strömen
- in Rückwärtsrichtung nur begrenzt Sperrfähig
- Grosse Sperrverluste vor allem beim Abchalten

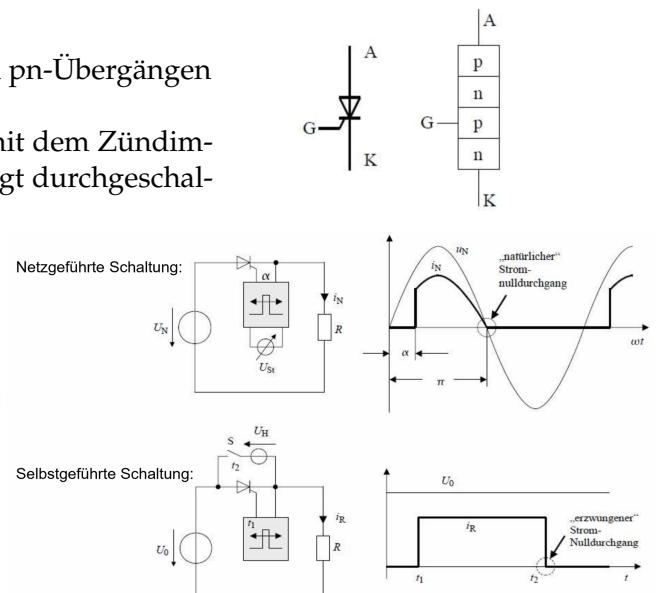
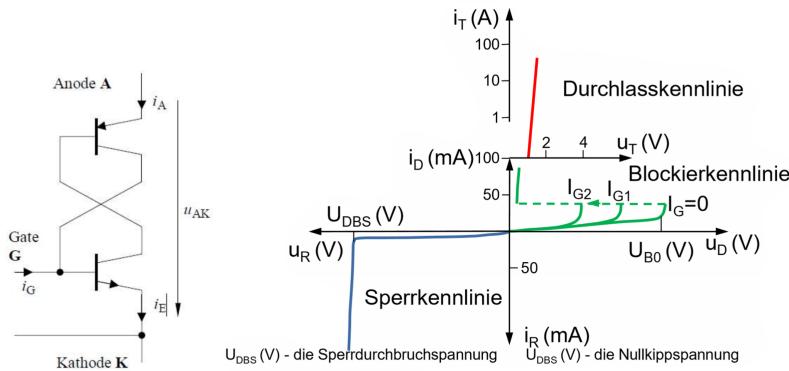
3.5 Transistoren im Vergleich

| | Darlington-Transistor | MOSFET | IGBT |
|---|---|--|---|
| Schaltsymbol |  |  |  |
| Schichtaufbau |  |  |  |
| Sperrverhalten- Obergrenze | mittel | niedrig | hoch |
| Steuergenerator - Aufwand - Leistung | mittel hoch | gering niedrig | gering niedrig |
| Schaltverhalten - Einschaltzeit - Abschaltzeit - Verlustleistung | mittel lang hoch | kurz kurz niedrig | mittel kurz niedrig |
| Durchlassverhalten - Stromtragfähigkeit - Verlustleistung | hoch niedrig | niedrig hoch | hoch niedrig |
| Pulsfrequenz | 4kHz | 250kHz | 20kHz |

4 Thyristoren

Ein Thyristor besteht aus vier Halbleiterschichten d.h. aus drei pn-Übergängen
Thyristoren sind einschaltbare Bauelemente.

Thyristoren sind einschaltbare Dioden. Thyristoren werden mit dem Zündimpuls der Zwischen Gate (G) und Kathode (K) kurzzeitig anliegt durchgeschalten.



4.1 Thermische Eratzschaltung

Thermische Kenngrössen

Wärmeleistung P [W]

Temperaturunterschied ϑ [K]

Wärmewiderstand R_{th} K/W

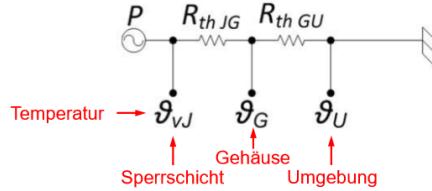
Elektrische Kenngrössen

Strom I [A]

Spannung [V]

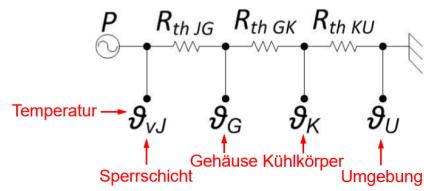
Widerstand (Ω /A)

4.1.1 Thyrisor ohne Kühlung



$$\vartheta_{VJ} - \vartheta_U = P \cdot (R_{th JG} + R_{th GU})$$

4.1.2 Thyrisor mit Kühlung

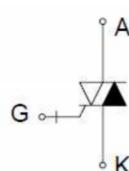


4.2 Abschaltbarer Thyristor

(GTO = Gate-Turn-Off)

Der GTO schaltet aus, wenn ein ausreichend hoher negativer Gate-Strom auftritt.

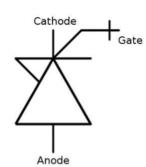
Amplitude des Gate-Stromes muss 20% bis 30% des abzuschaltenden GTO-Stromes betragen.



4.3 IGCT

Integrated Gate-Commuted Thyristor (IGCT) sind die Weiterentwicklung der GTO.

Sie werden hauptsächlich für Mittelspannungsumrichter eingesetzt.



5 Stromrichterschaltung

5.1 Gruppierung

5.1.1 nach Steuerung

- Ungesteuerte Stromrichter:

Das Verhältniss von Eingangs- zu Ausgangsspannung wird durch die Stromrichterschaltung festgesetzt

- Gesteuerte Stromrichter

Das Verhältniss von Eingangs- zu Ausgangsspannung wird durch Steuereingriff am Halbleiterschalter verändert.

5.1.2 nach Führung

Kommuntierung WIKI

Bzw nach der Herlkunft der Kommutierungsspannung.

Kommutierung bedeutet die Wechselung des Stromflusses von einem HL-Ventil auf ein anderes.

- Netzgeführte Schaltung

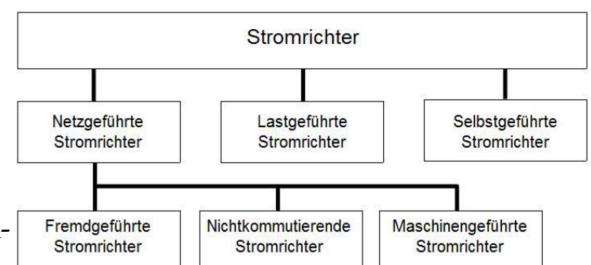
Kommutierungsspannung vom Netzwerk

- Lastgeführte Schaltung

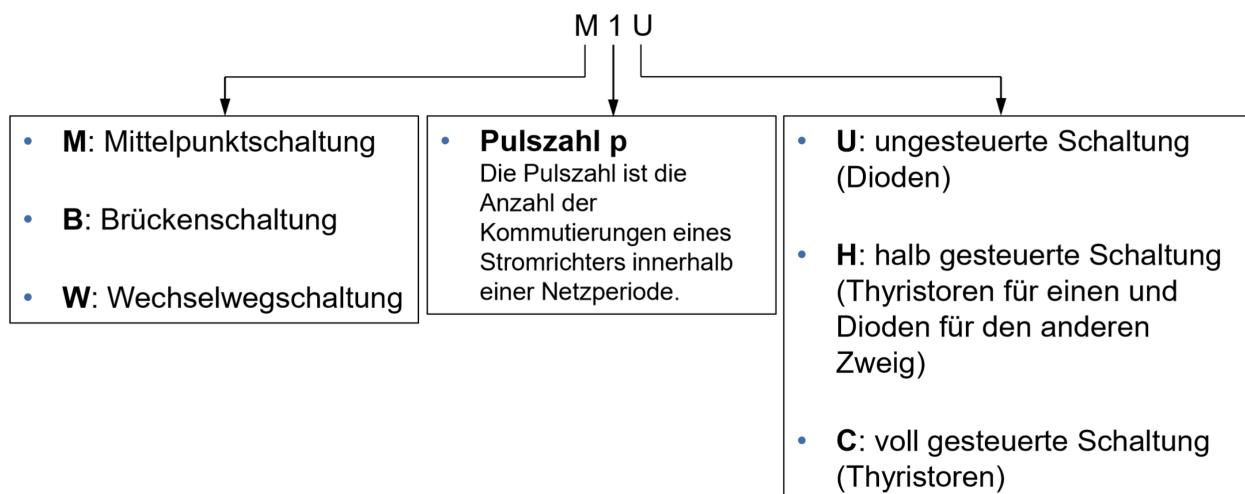
Kommutierungsspannung wird durch Lastkreis (zb Synchromotor) gesteuert

- Selbstgeführte Schaltung

Kommutierungsspannung wird selbst erzeugt



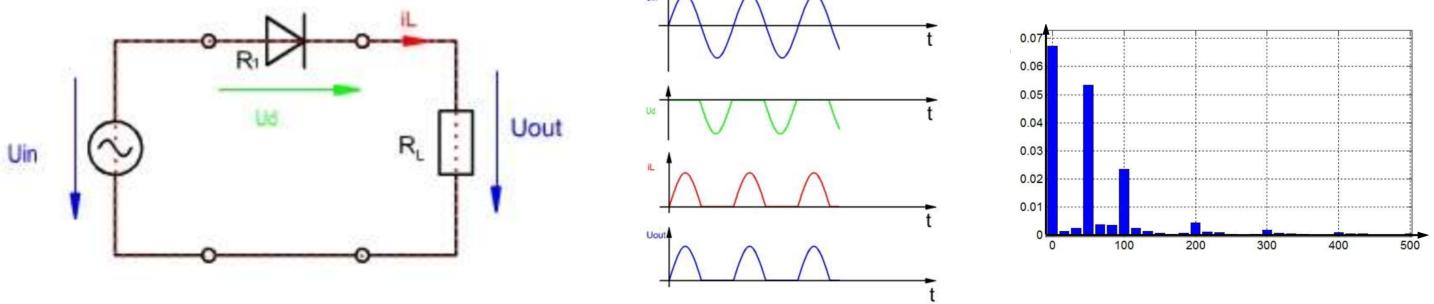
5.2 Kennzeichnung



Gleichrichter WIKI

6 Ungesteuerter Gleichrichter

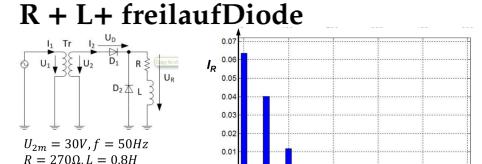
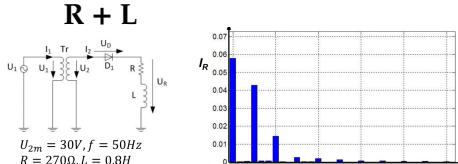
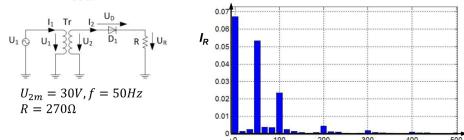
6.1 M1U



Die Diode wird als Ideal betrachtet → keine Schwellenspannung oder Innenwiderstand

| | | |
|--------------------------------|--|---|
| Grundgleichungen | $U_2 = U_D + U_R$ $U_R = I_2 \cdot R$ $\bar{U}_{OUT} = \frac{\hat{U}}{\pi}$ | Durchlassrichtung $0 < \omega t < \pi$ $U_2 = U_R \quad U_D = 0$ |
| Wirkleistung der Last R | $P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\alpha) d\alpha = \frac{U_{R RMS}^2}{R}$ | Sperrichtung $\pi < \omega t < 2\pi$ $U_2 = U_D \quad U_R = 0$ |

Oberwellen



6.1.1 Rechnungsbsp.

Übung 2 - Gleichrichter M1U

Ausgangslage:

$$U_2 = U_{2m} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Mittelwert Spannung:

$$U_{R AV} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{2m} \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha = \frac{U_{2m}}{\pi} \quad \alpha = \omega t$$

Effektivwert Spannung:

$$U_{R RMS} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{2m}^2 \cdot \sin(\alpha)^2 \cdot d\alpha} = \frac{U_{2m}}{2}$$

Mittelwert Strom:

$$I_{R AV} = \frac{U_{R AV}}{R_L} = \frac{1}{\pi} \frac{U_{2m}}{R} = \frac{1}{\pi} I_{2m}$$

Effektivwert Strom:

$$I_{R RMS} = \frac{U_{R RMS}}{R} = \frac{U_{2m}}{2 \cdot R} = \frac{I_{2m}}{2}$$

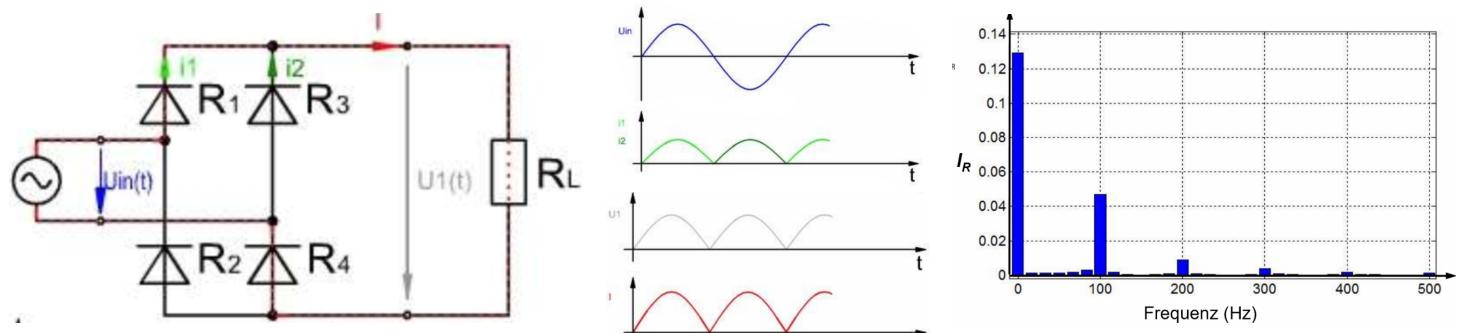
Wirkleistung R:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{u_R^2(\alpha)}{R} \cdot d\alpha = \frac{U_{R RMS}^2}{R} = \frac{1}{R} \frac{U_{2m}^2}{4}$$

Wirkleistung Sekundärseite:

$$P_2 = U_2 \cdot (I_2)_1 \cdot \cos(\varphi)_1 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{b_1}{\sqrt{2} \cdot R}$$

6.2 B2U



Im Gegensatz zur M1U-Schaltung wird hier die negative Netzspannung zur Gleichrichtung genutzt.
Die Schaltung wird oft mit Glättungskondensator betrieben.

| | |
|-------------------------|---|
| Grundgleichungen | $\bar{U}_{OUT} = 2 \frac{\hat{U}}{\pi}$ |
|-------------------------|---|

6.2.1 Rechnungsbsp.

Übung 3 - Gleichrichter B2U

Ausgangslage:

$$U_2 = U_{2m} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Mittelwert Spannung:

$$U_{R\text{AV}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \cdot \sin(\alpha) \cdot d\alpha = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi} \quad \alpha = \omega t$$

Effektivwert Spannung:

$$U_{R\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m}^2 \cdot \sin(\alpha)^2 \cdot d\alpha} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}}$$

Mittelwert Strom:

$$I_{R\text{AV}} = \frac{U_{R\text{AV}}}{R_L} = \frac{2}{\pi} \frac{U_{2m}}{R} = \frac{2}{\pi} I_{2m}$$

Effektivwert Strom:

$$I_{R\text{RMS}} = \frac{U_{R\text{RMS}}}{R} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2} \cdot R} = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}}$$

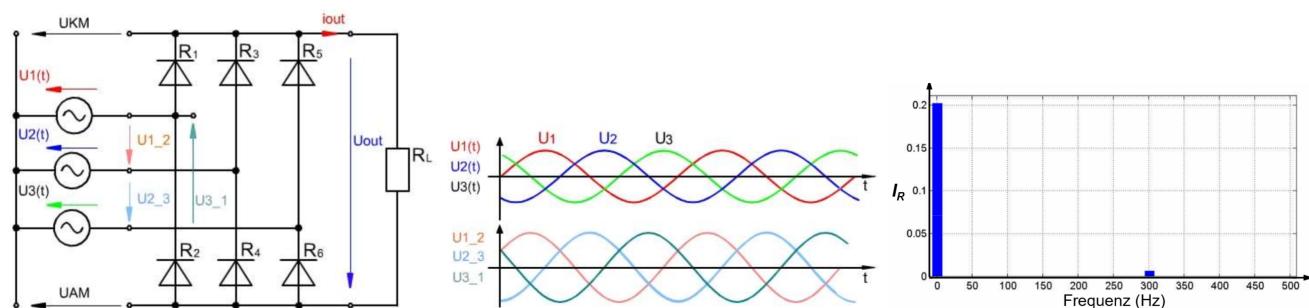
Wirkleistung R:

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{U_{R\text{RMS}}^2(\alpha)}{R} \cdot d\alpha = \frac{U_{R\text{RMS}}^2}{R} = \frac{1}{R} \frac{U_{2m}^2}{2}$$

Wirkleistung Sekundärseite:

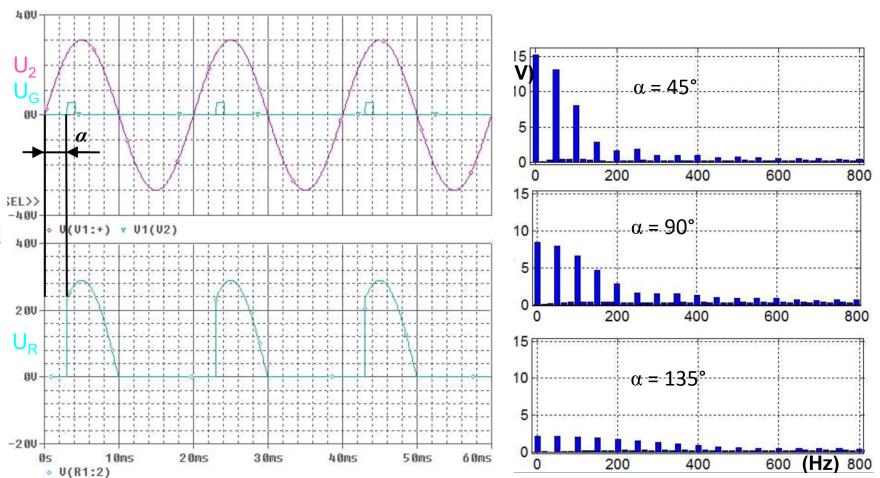
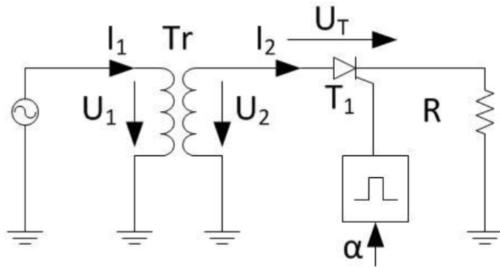
$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = U_2 \cdot \frac{U_2}{R} = U_2 \cdot \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}R}$$

6.3 B6U



6.4 Gesteuerte Gleichrichter

6.4.1 M1C



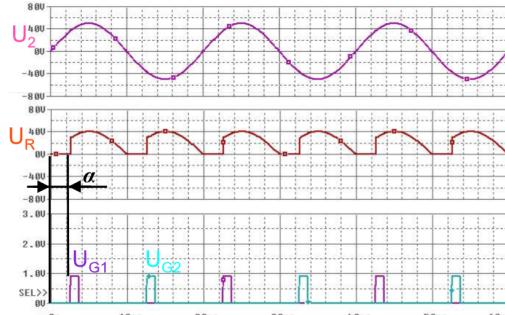
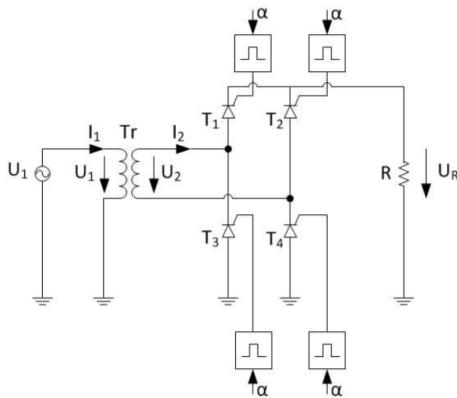
Grundgleichungen

$$\bar{U}_{OUT} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \hat{U}_2 \cdot \sin(\beta) d\beta$$

$$= \frac{\hat{U}_2}{2\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

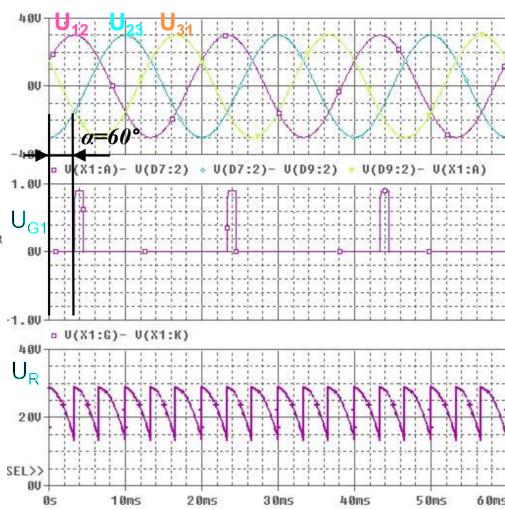
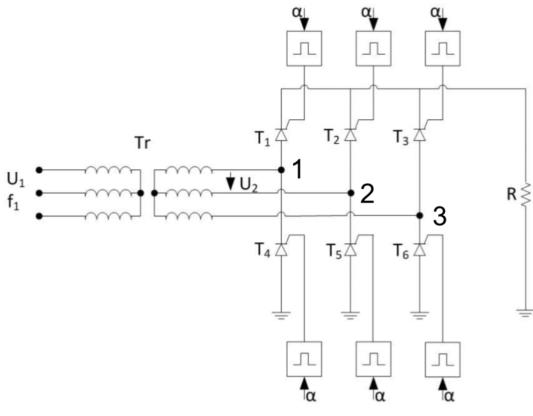
$$\beta = \omega t$$

6.4.2 B2C



todo Oberwellen grafik

6.4.3 B6C

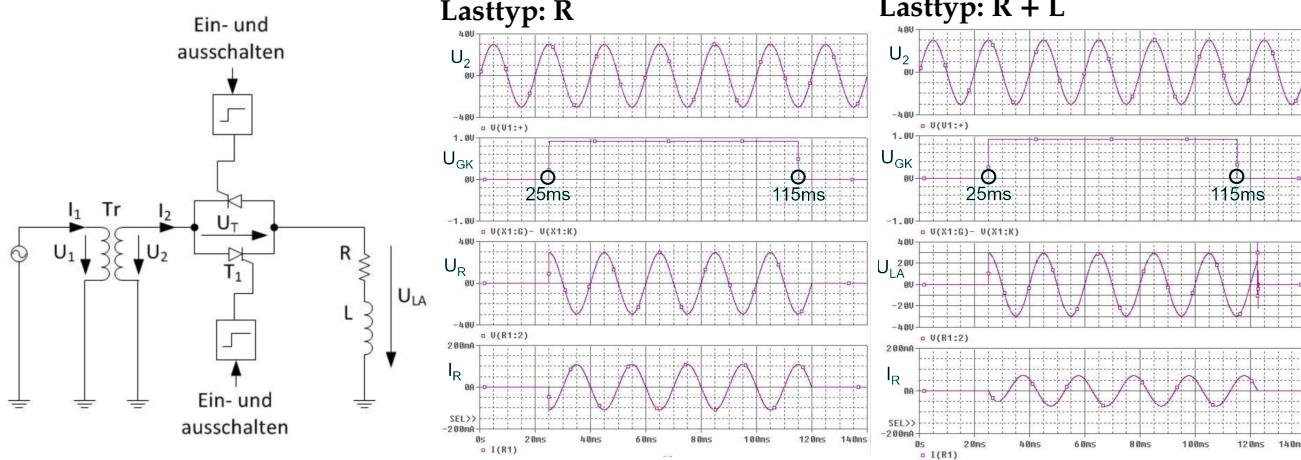


todo Oberwellengrafik

6.5 Wechselstrom-Schalter/Steller

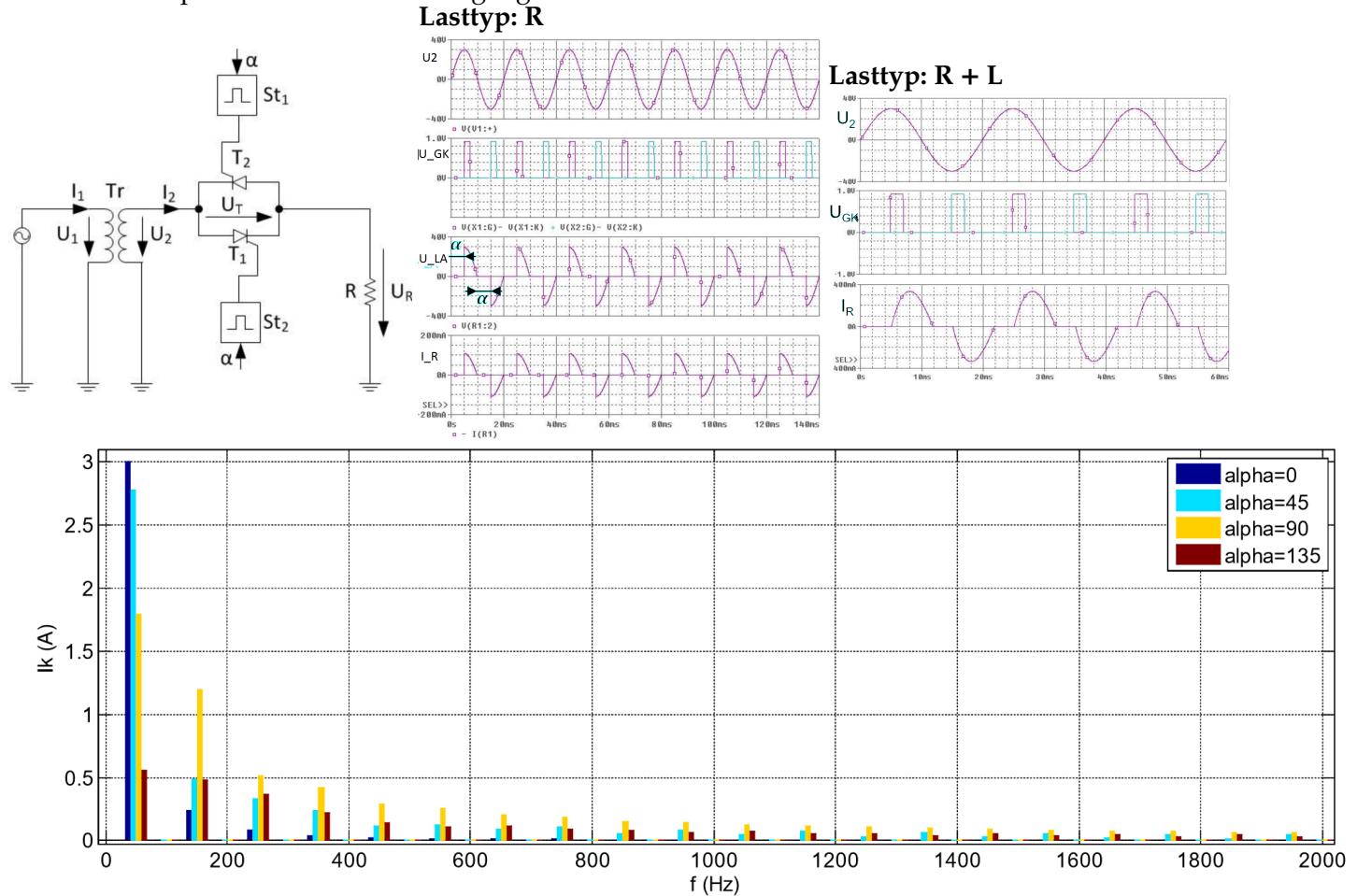
6.5.1 Wechselstrom-Schalter

Wegen dem Polaritätswechsel besteh der Wechselstromschalter aus zwei antiparallelen Thyristoren, welche die Stromhalbschwingung abwechselnd ausführen.



6.5.2 Wechselstrom-Steller

Im vergleich mit den Wechselstrom-Schalter, welche eimaligs Ein- oder Ausschalten von Wechselstromkreisen ermöglichen, erlaubt der Wechselstrom-Steller in jeder Halbperiode wiederholtes Einschalten, wobei der Strom vom Zündzeitpunkt bis zm Nulldurchgang fliesst.



7 Gleichstromumrichter

Ein Gleichstromumrichter dient zur Änderung von: **Polarität, Spannung, Strom.**

$$\tau = \frac{L_1}{R_1} \quad T_s = T_{on} + T_{off} \quad D = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{t_{on}}{T_s}$$

7.1 Buck-Converter

Tiefsetzsteller (Buck-Converter) $U_a < U_e$

Rechnung ohne C

$$V_1 = i_L \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{di_L}{dt}$$

$$0 < t < T_{on}$$

$$0 = i_L \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{di_L}{dt}$$

$$T_{on} < t < T_s$$

$$i_L = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_1}{R_1} \cdot \frac{e^{-\frac{T_{off}}{\tau}} - 1}{1 - e^{-\frac{T_s}{\tau}}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$0 < t < T_{on}$$

$$i_L = \frac{V_1}{R_1} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{T_{on}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T_s}{\tau}}} \cdot e^{-\frac{t-T_{on}}{\tau}}$$

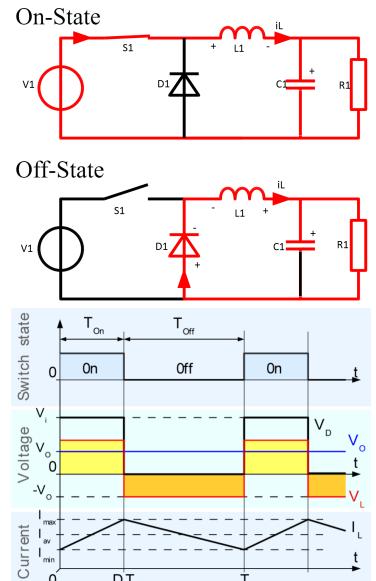
$$T_{on} \leq t \leq T_s$$

$$i_{Lmax} = i_L(T_{on}) \quad i_{Lmin} = i_L(0) = i_L(T_s)$$

$$T_{off} = -\tau \cdot \ln \frac{i_{Lmin}}{i_{Lmax}} = -\frac{L_1}{R_1} \cdot \ln \frac{i_{Lmin}}{i_{Lmax}}$$

$$T_{on} = -\tau \cdot \ln \left(\frac{\frac{1}{i_{Lmax}} \cdot \frac{V_1}{R_1} - 1}{\frac{1}{i_{Lmax}} \cdot \frac{V_1}{R_1} - e^{-\frac{T_{off}}{\tau}}} \right)$$

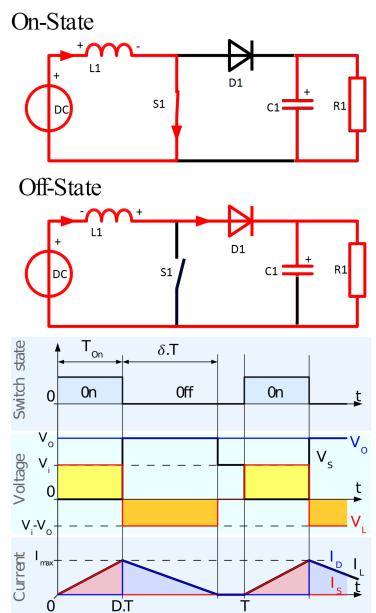
$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} - V_D \frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}}$$



7.2 Boost-Converter

Hochsetzsteller (Boost-Converter) $U_a > U_e$

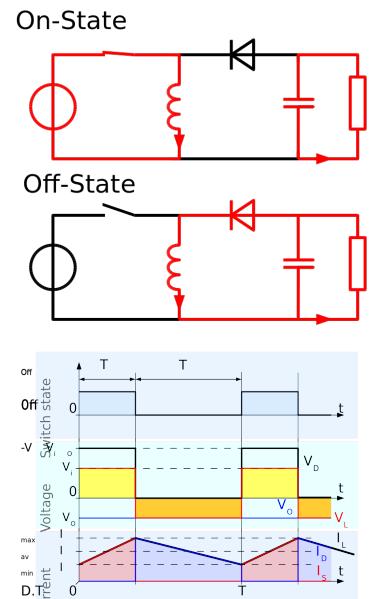
$$V_{Out} = V_{in} \cdot \left(1 + \frac{T_{on}}{T_{off}} \right)$$



7.3 Inverse-Converter

Inverswandler, Umkehrung der Polarität

$$V_{out} = -L \cdot \frac{\Delta I_L}{\Delta t} \xrightarrow{\text{eingeschwungen}} V_L \cdot \frac{T_{on}}{T_{off}}$$



7.4 Gleichstrom-Schalter/Steller

7.4.1 Gleichstrom-Schalter

$$U_1 = (L + L_\sigma) \cdot \frac{di_L}{dt} + R \cdot i_L \quad t_{on} \leq t \leq t_{off}$$

$$0 = L \cdot \frac{di_L}{dt} + R \cdot i_L \quad t_{off} \leq t$$

$$i_L(t) = \frac{U_1}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t-t_{on}}{\tau}}) \quad t_{on} \leq t \leq t_{off}$$

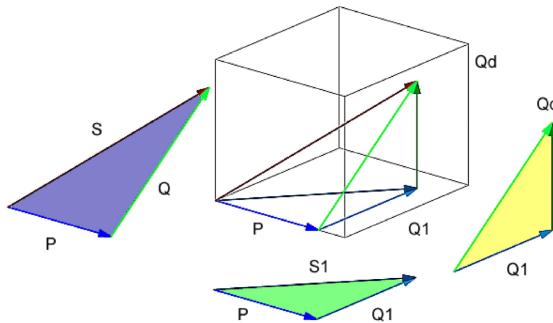
$$i_L(t) = \frac{U_1}{R} \cdot e^{\frac{t-t_{off}}{\tau}} \quad t_{off} \leq t$$

7.4.2 Gleichstrom-Steller

$$U_{2AV} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \int_0^{t_e} U_1 \cdot dt = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} U_1$$

8 Grundformeln

8.1 Leistungen



Verzerrungsblindleistung entsteht, wenn I_1 und U nicht in Phase sind. Wenn Oberwellen von Spannung und Strom die gleichen Frequenzanteile besitzen entsteht keine Verzerrung.

| | | |
|--|---|---|
| Scheinleistung | $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + Q_d^2}$ | i konjkolpex????? V5S10 vs V7S14 |
| Wirkleistung | $P = U \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$ | |
| Blindleistung | $Q = U \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_1 = \sqrt{Q_1^2 + Q_d^2}$ $Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1$ $Q_d = U \cdot \sqrt{\sum_{m=2}^{\infty} I_m^2} = k \cdot S$ | Q_1 = Grundschwingungs-Blindleistung Q_d = Verzerrungsleistung |
| Grundschwingungs-scheinleistung | $S_1 = U_1 \cdot I_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2}$ | S_1 = Grundschwingungs-Scheinleistung |
| Berechnung des Mittelwertes | $X_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{min}^{2\pi} \hat{U}_m \cdot \sin(\beta) d\beta$ | |
| Berechnung des Gleichwertes | $\overline{ X } = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$ | |
| Berechnung des Effektivwertes | $X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$ | |
| Effektivwert Oberwellen | $X_{RMS_Oberwellen} = \sqrt{X_{RMS}^2 - X_{AV}^2}$ | |
| Formfaktor | $F = \frac{X_{RMS}}{\overline{ X }}$ | |
| Klirrfaktor | $k = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}}$ | |
| Welligkeit | $w = \frac{X_{RMS_Oberwellen}}{ X_{AV} } = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} X_k^2}}{ X_{AV} } = \sqrt{F^2 - 1}$ | |
| Leistungsfaktor | $\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I} \cos\varphi_1$ | |

8.2 Fourier

8.2.1 Allgemeine Form

Eine periodische Funktion lässt sich durch eine Reihe von Sinus- und Kosinusfunktionen darstellen.

$$f(t) = \underbrace{\frac{a_0}{2}}_{\text{Gleichanteil}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(k\omega t) + b_k \cdot \sin(k\omega t))}_{\text{Wechselanteil}} = f_{AV} + \sum_{k=1}^{\infty} \underbrace{c_k}_{\substack{\text{Amplitude der Harmonischen}}} \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

Die Koeffizienten der Entwicklung von $f(t)$ sind:

| |
|---|
| $a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$ |
| $a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(k\omega t) dt \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$ |
| $b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(k\omega t) dt \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$ |
| $c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ |
| $\varphi_k = \arctan\left(\frac{b_k}{a_k}\right)$ |

8.2.3 Komplexe Darstellung der Fourierreihen

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{jk\omega t}$$

$$c_n = \overline{c_{-n}} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-jn\omega t} dt$$

8.2.2 Orthogonalitätsbeziehungen

$$\int_0^T \cos(n\omega t) \cdot \cos(m\omega t) dt = \begin{cases} T, & n = m = 0 \\ \frac{T}{2}, & n = m > 0 \\ 0, & n \neq m \end{cases}$$

$$\int_0^T \sin(n\omega t) \cdot \sin(m\omega t) dt = \begin{cases} \frac{T}{2}, & n = m \\ 0, & n \neq m \end{cases}$$

$$\int_0^T \cos(n\omega t) \cdot \sin(m\omega t) dt = \begin{cases} 0, & n-m = \text{gerade Zahl} \\ \frac{2m}{m^2 - n^2}, & n-m = \text{ungerade Zahl} \end{cases}$$

8.2.4 Umrechnungsformeln

$$c_n = \overline{c_{-n}} = \frac{a_n - jb_n}{2} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots \text{ wobei } b_0 = 0)$$

$$\left. \begin{array}{l} a_n = 2 \cdot \operatorname{Re}(c_n) \\ b_n = -2 \cdot \operatorname{Im}(c_n) \end{array} \right\} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots, b_0 = 0)$$

8.2.5 Sätze zur Berechnung der Fourierkoeffizienten

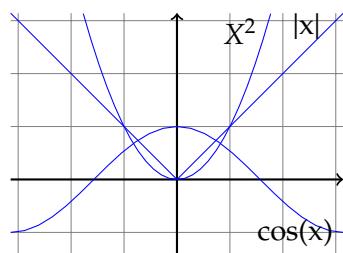
Symmetrie

Gerade

$$f(t) = f(-t)$$

Symmetrisch an Y-Achse

$$b_n = 0, a_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt$$

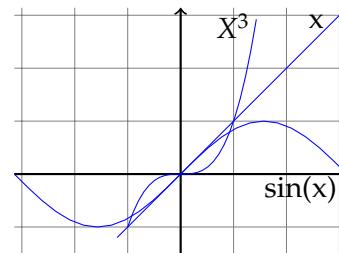


Ungerade

$$f(-t) = -f(t)$$

Punktsymmetrisch am Ursprung

$$a_n = 0, b_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt$$



9 Lösen von Differentialgleichungen

9.1 Allgemeine Vorgehensweisen

9.1.1 Trennung von Variablen / Separation

Form: $y' = f(x)g(y)$

Vorgehen:

1. DGL umstellen: $\frac{y'}{g(y)} = f(x)$
2. Beidseitig nach x integrieren wobei $dx = \frac{dy}{y'}$
3. Grenzen anpassen: $\int_{y_0=y(x_0)}^y \frac{1}{g(y)} dy = \int_x^{x_0} f(x) dx$

9.1.2 Lineartermsubstitution

Form: $y' = f(ax + by + c)$

Vorgehen:

1. Substitution: $z = ax + by + c$
2. Einsetzen in $z' = a + bf(z)$
3. Separation: $\frac{z'}{f(z)} = a + b$ wobei $z_0 = x_0 + y_0$

9.1.3 Gleichgradigkeit

Form: $y' = f(\frac{y}{x})$

Vorgehen:

1. Substitution: $z = \frac{y}{x}$
2. Einsetzen in $z' = \frac{1}{x}(f(z) - z)$
3. Separation: $\frac{z'}{f(z)-z} = \frac{1}{x}$ wobei $z_0 = \frac{y_0}{x_0}$

9.2 Differentialgleichung 1. Ordnung

9.2.1 Konstante Störung $f(x) = A$

1. Homogene Lösung mit $y_h = 0$ berechnen
2. Partikuläre Lösung mit $y_p = B$ (= Konstante) berechnen, indem zeitlich abhängige Terme der DGL ignoriert werden

9.2.2 Sinusförmige Störung $f(x) = (A \cdot \cos \omega x + B \cdot \sin \omega x)$

1. Homogene Lösung mit $y_h = 0$ berechnen
2. Ansatz für Partikuläre Lösung: $y_p = C \cdot \sin(\omega t) + D \cdot \cos(\omega t)$
3. y_p in DGL einsetzen, C und D per Koeffizientenvergleich ermitteln

10 Idiotenseite

10.1 SI-Vorsätze

| Symbol | Name | Wert | Binär | Symbol | Name | Wert |
|--------|-------|-----------|-----------------|----------|-------|------------|
| da | Deka | 10^1 | | d | Dezi | 10^{-1} |
| h | Hekto | 10^2 | | c | Centi | 10^{-2} |
| k | Kilo | 10^3 | $2^{10} = 1024$ | m | Mili | 10^{-3} |
| M | Mega | 10^6 | 2^{20} | y, μ | Mikro | 10^{-6} |
| G | Giga | 10^9 | 2^{30} | n | Nano | 10^{-9} |
| T | Tera | 10^{12} | 2^{40} | p | Piko | 10^{-12} |
| P | Peta | 10^{15} | 2^{50} | f | Femto | 10^{-15} |

10.2 Funktionswerte für Winkelargumente

| deg | rad | sin | cos | tan | deg | rad | sin | cos | deg | rad | sin | cos | deg | rad | sin | cos |
|-----|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----|------------------|----------------------|-----------------------|-----|------------------|-----------------------|-----------------------|-----|-------------------|-----------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 90 | $\frac{\pi}{2}$ | 1 | 0 | 180 | π | 0 | -1 | 270 | $\frac{3\pi}{2}$ | -1 | 0 |
| 30 | $\frac{\pi}{6}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\frac{\sqrt{3}}{3}$ | 120 | $\frac{2\pi}{3}$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $-\frac{1}{2}$ | 210 | $\frac{7\pi}{6}$ | $-\frac{1}{2}$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}$ | 300 | $\frac{5\pi}{3}$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\frac{1}{2}$ |
| 45 | $\frac{\pi}{4}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ | 1 | 135 | $\frac{3\pi}{4}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $-\frac{\sqrt{2}}{2}$ | 225 | $\frac{5\pi}{4}$ | $-\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $-\frac{\sqrt{2}}{2}$ | 315 | $\frac{7\pi}{4}$ | $-\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ |
| 60 | $\frac{\pi}{3}$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\sqrt{3}$ | 150 | $\frac{5\pi}{6}$ | $\frac{1}{2}$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}$ | 240 | $\frac{4\pi}{3}$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $-\frac{1}{2}$ | 330 | $\frac{11\pi}{6}$ | $-\frac{1}{2}$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ |

10.3 Periodizität

$$\cos(a + k \cdot 2\pi) = \cos(a) \quad \sin(a + k \cdot 2\pi) = \sin(a) \quad (k \in \mathbb{Z})$$

10.4 Quadrantenbeziehungen

$$\sin(-a) = -\sin(a)$$

$$\cos(-a) = \cos(a)$$

$$\sin(\pi - a) = \sin(a)$$

$$\cos(\pi - a) = -\cos(a)$$

$$\sin(\pi + a) = -\sin(a)$$

$$\cos(\pi + a) = -\cos(a)$$

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - a\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} + a\right) = \cos(a)$$

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - a\right) = -\cos\left(\frac{\pi}{2} + a\right) = \sin(a)$$

10.6 Additionstheoreme

$$\sin(a \pm b) = \sin(a) \cdot \cos(b) \pm \cos(a) \cdot \sin(b)$$

$$\cos(a \pm b) = \cos(a) \cdot \cos(b) \mp \sin(a) \cdot \sin(b)$$

$$\tan(a \pm b) = \frac{\tan(a) \pm \tan(b)}{1 \mp \tan(a) \cdot \tan(b)}$$

$$\sin(a) \sin(b) = \frac{1}{2}(\cos(a - b) - \cos(a + b))$$

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{1}{2}(\cos(a - b) + \cos(a + b))$$

$$\sin(a) \cos(b) = \frac{1}{2}(\sin(a - b) + \sin(a + b))$$

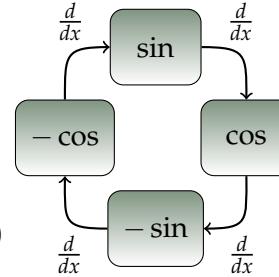
10.8 Euler-Formeln

$$\sin(x) = \frac{1}{2j}(e^{jx} - e^{-jx}) \quad \cos(x) = \frac{1}{2}(e^{jx} + e^{-jx})$$

$$e^{x+jy} = e^x \cdot e^{jy} = e^x \cdot (\cos(y) + j \sin(y))$$

$$e^{j\pi} = e^{-j\pi} = -1$$

10.5 Ableitungen



10.7 Doppel- und Halbwinkel

$$\sin(2a) = 2 \sin(a) \cos(a)$$

$$\cos(2a) = \cos^2(a) - \sin^2(a) = 2 \cos^2(a) - 1 = 1 - 2 \sin^2(a)$$

$$\cos^2\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{1+\cos(a)}{2} \quad \sin^2\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{1-\cos(a)}{2}$$

10.9 Summe und Differenz

$$\sin(a) + \sin(b) = 2 \cdot \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

$$\sin(a) - \sin(b) = 2 \cdot \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

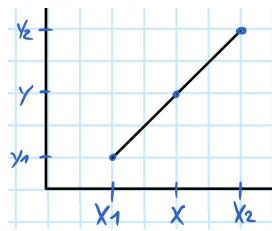
$$\cos(a) + \cos(b) = 2 \cdot \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

$$\cos(a) - \cos(b) = -2 \cdot \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

$$\tan(a) \pm \tan(b) = \frac{\sin(a \pm b)}{\cos(a) \cos(b)}$$

10.10 Geradengleichung Interpolieren

$$y(x) = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$



10.11 Grad <-> Rad

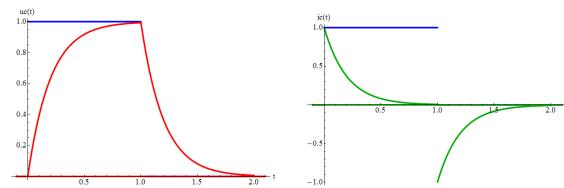
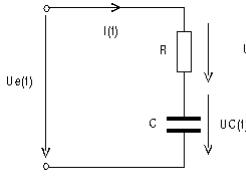
$$\alpha_{rad} = \alpha_{grad} \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$\alpha_{grad} = \alpha_{rad} \cdot \frac{180}{\pi}$$

10.12 Einschaltvorgänge

10.12.1 Kondensator

Serieschaltung von Widerstand und Kondensator an einem Rechtecksignal U_e



Ladevorgang:

$$u_C(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_C \cdot C}}\right)$$

$$i_C(t) = \frac{U_0}{R_C} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{R_C \cdot C}}$$

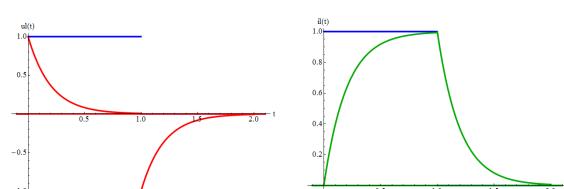
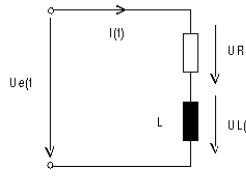
Entladevorgang

$$u_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R_C \cdot C}}$$

$$i_C(t) = -\frac{U_0}{R_C} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -I_0 \cdot e^{-\frac{t}{R_C \cdot C}}$$

10.12.2 Spule

Serieschaltung von Widerstand und Spule an einem Rechtecksignal U_e



Ladevorgang

$$i_L(t) = I_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \frac{U_0}{R_L} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t \cdot R_L}{L}}\right)$$

$$u_L(t) = \hat{u} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \hat{u} \cdot e^{-\frac{t \cdot R_L}{L}}$$

Entladevorgang

$$i_L(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U_0}{R_L} \cdot e^{-\frac{t \cdot R_L}{L}}$$

$$u_L(t) = -\hat{u} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -\hat{u} \cdot e^{-\frac{t \cdot R_L}{L}}$$

10.14 Grundelemente

Ohmscher Widerstand R

u und i können sprunghaft ändern

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

$$i(t) = \frac{u(t)}{R}$$

$$\underline{Z}_R = R$$

nicht linear: $R_+(u) = \frac{U}{I(u)}$, $r_D = \frac{dU}{dt}|_{U_0}$

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

Kapazität C

u kann nicht sprunghaft ändern

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + u(0)$$

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$$

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} \quad B_C = \omega C$$

$$Q_C = -U^2 \cdot \omega C = -\frac{I^2}{\omega C}$$

$$W_C = \frac{1}{2} C U_C^2$$

Induktivität L

i kann nicht sprunghaft ändern

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau + i(0)$$

$$\underline{Z}_L = j\omega L$$

$$X_L = \omega L \quad B_L = -\frac{1}{\omega L}$$

$$Q_L = I^2 \cdot \omega L = \frac{U^2}{\omega L}$$

$$W_L = \frac{1}{2} L I_L^2$$

10.13 Eigenschaften unterschiedlicher Schwingungsformen

| Schwingungsform | Funktion | Gleichrichtwert | Formfaktor | Effektivwert | Scheitelfaktor | X_0 | X^2 | $\text{var}(X)$ |
|-----------------|--|---|--------------------------------------|---|---|-------------------|---|--------------------------------------|
| Formel | | $\overline{ x } = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$ | $\frac{\overline{X}}{ x }$ | $X = \sqrt{\overline{X^2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt}$ | $k_s = \frac{X_{\max}}{X_{\text{eff}}}$ | | | |
| | | | | | | | | |
| | $A \cdot \sin(t)$ | $\frac{2}{\pi} \approx 0.637$ | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.11$ | $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$ | $\sqrt{2} \approx 1.414$ | 0 | $\frac{A^2}{2}$ | $\frac{A^2}{2} - \frac{4A^2}{\pi^2}$ |
| | | | | | | | | |
| | $A \cdot \sin(t) $ | $\frac{2}{\pi} \approx 0.637$ | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.11$ | $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$ | $\sqrt{2} \approx 1.414$ | $\frac{2A}{\pi}$ | $\frac{A^2}{2}$ | $\frac{A^2}{2} - \frac{4A^2}{\pi^2}$ |
| | | | | | | | | |
| | $\begin{cases} A \cdot \sin(t) & 0 < t < \pi \\ 0 & \text{True} \end{cases}$ | $\frac{1}{\pi} \approx 0.318$ | $\frac{\pi}{2} \approx 1.571$ | $\frac{1}{2} = 0.5$ | 2 | $\frac{A}{\pi}$ | $\frac{A^2}{4}$ | $\frac{A^2}{4} - \frac{A^2}{\pi^2}$ |
| | | | | | | | | |
| | $A \cdot \Lambda(t)$ | $\frac{1}{2} = 0.5$ | $\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1.155$ | $\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0.557$ | $\sqrt{3} \approx 1.732$ | 0 | $\frac{A^2}{3}$ | $\frac{A^2}{3}$ |
| | | | | | | | | |
| DC | $\begin{cases} A & 0 < x < t \\ 0 & \text{True} \end{cases}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | A^2 | A^2 |
| | | | | | | | | |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - |
| | | | | | | | | |
| | | $\frac{t_1}{T}$ | $\sqrt{\frac{T}{t_1}}$ | $\sqrt{\frac{t_1}{T}}$ | $A \frac{t}{T}$ | $A^2 \frac{t}{T}$ | $\frac{A^2 t}{T} - \frac{A^2 t^2}{T^2}$ | |