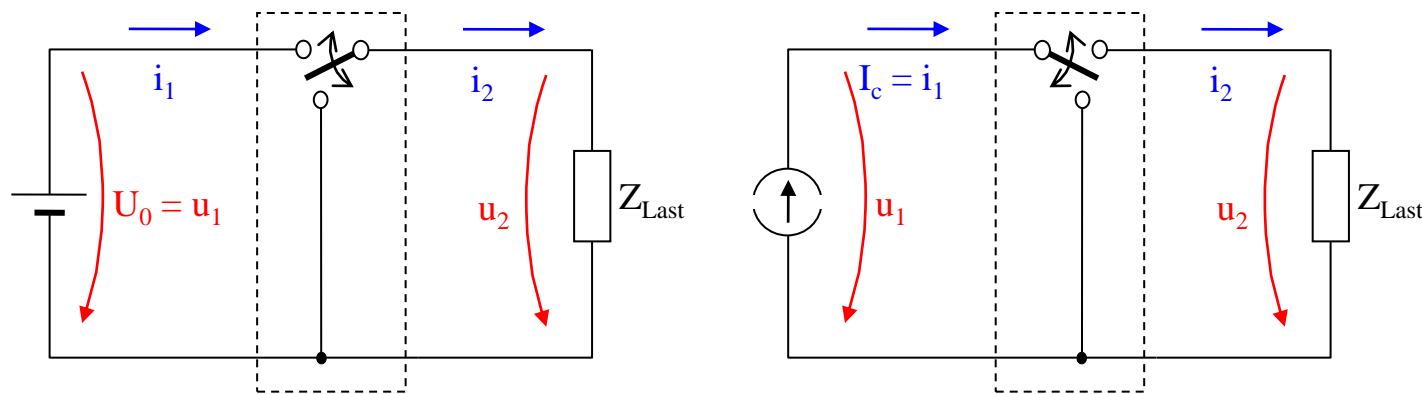


3. Leistungselektronische Energiewandler

3.1 Arbeitsweise von Stromrichtern

Vorläufer der Stromrichter waren Kommutatoren (allgemeiner rotierende Kontakte) → periodisch synchron zum Vorgang ein-, aus-, umschalten.

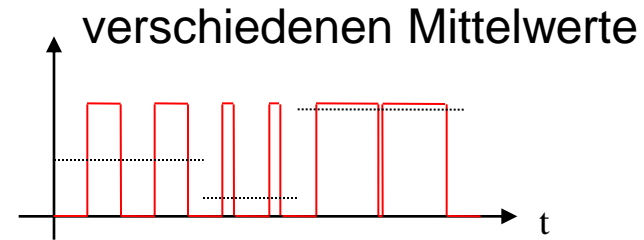
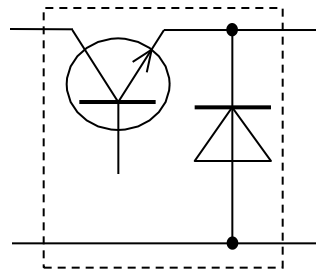
Grundprinzip: leistungselektronischer Strom-, Wechsel- oder Umrichter
→ zwei einfachste Schaltungen (DC - DC – Wandler)



Wirkprinzip: - beide Schaltungen mit idealen Umschalter
- in *einer Schalterstellung* → Strom von Quelle zur Last
- periodisches Schalten → **Mittelwert** für Speisung

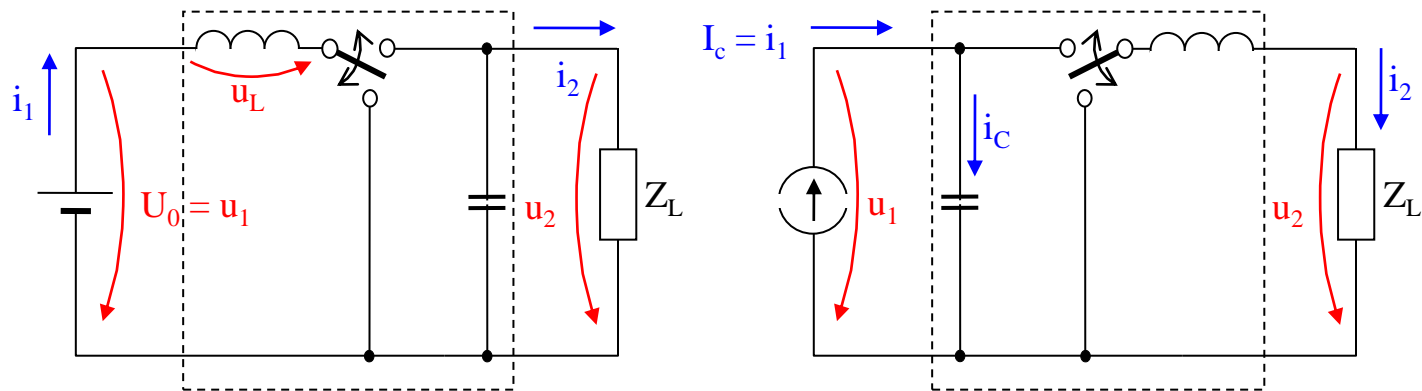
Linke Schaltung: *nur* ideale Spannungsquelle und Ohm'sche / induktive Last
Rechte Schaltung: *nur* ideale Stromquelle und Ohm'sche / kapazitive Last

Praktische Realisierung des Umschalters



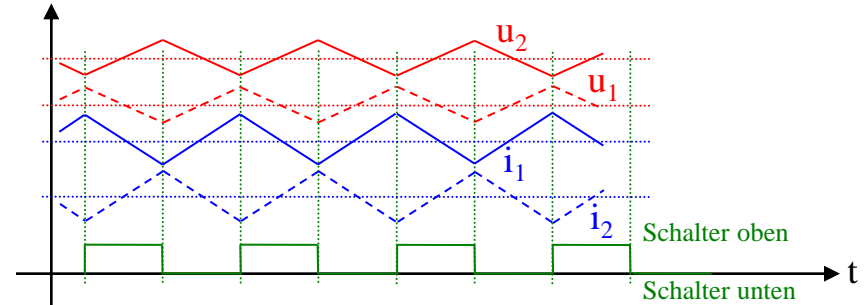
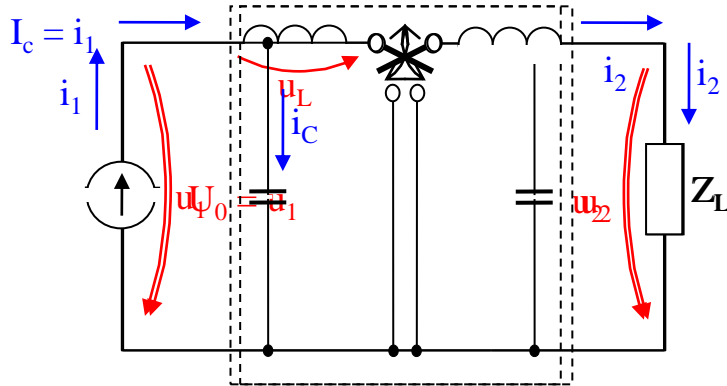
Niemals Schalter: *parallel zu Kapazität* oder *Spannungsquelle* bzw. *in Reihe mit einer Induktivität* oder *Stromquelle*

Für viele Anwendungen → rechteckförmige Spannungen oder Ströme ungünstig
 → Glättung (Induktivitäten oder Kapazitäten der Last glätten von selbst.)



- auf Seite der **Spannungsquelle** (und ev. rein **kapazitiver Last**) nur **Induktivität**
- auf Seite der **Stromquelle** (und ev. rein **induktiver Last**) nur **Kapazität**
- Glättungsinduktivität **keine Stromunterbrechung**, Glättungskapazität **kein Kurzschluss**
- **beliebige Last** und auch **reale Quellen**

Schaltungen quasi eine Umkehrung voneinander → bei Last mit entsprechender Quelle (z.B. Motor → Generatorbremse) auch Rückspeisen.



Schalterstellungen:

(oben) Einspeisen Strom → ↓ Strom der Induktivität i_1 und ↑ u_2 des Kondensators

$$L di_1/dt = U_0 - u_2 < 0 \quad \text{und} \quad C du_2/dt = i_1 - i_2 > 0$$

(unten) Kurzschluss → ↑ Strom der Induktivität i_1 und ↓ u_2 des Kondensators

$$L di_1/dt = U_0 > 0 \quad \text{und} \quad C du_2/dt = -i_2 < 0.$$

Schalterstellungen:

(oben) Einspeisen Strom → ↓ u_1 des Kondensators und ↑ Strom der Induktivität i_2

$$C du_1/dt = i_1 - i_2 < 0 \quad \text{und} \quad L di_2/dt = u_1 - u_2 > 0$$

(unten) Leerlauf → ↑ u_1 des Kondensators und ↓ Strom der Induktivität i_2

$$C du_1/dt = i_1 < 0 \quad \text{und} \quad L di_2/dt = -u_2 < 0.$$

periodisches Schalten → zwischen Ansteigen und Abfallen ein Gleichgewicht

Tastverhältniss → $t_{\text{oben}}/t_{\text{unten}}$ beim Schalten → **Mittelwert** \bar{U}_1/\bar{U}_2

Schalterstellung bei 1. oben → Verringerung des Stromes der Induktivität →
Kondensatorspannung muss höher als Spannung der Spannungsquelle sein.

$$u_c = u_2 > U_0 = u_1 \quad (\text{damit } u_L = U_0 - u_2 = L di_1/dt = \text{negativ})$$

$$u_2 > u_1 \quad \text{für Gleichgewicht wird } \overline{u_1 i_1} = \overline{u_2 i_2} \text{ und somit } i_1 > i_2$$

Schalterstellung bei 2. oben → Entladen des Kondensators →
Kondensatorspannung muss höher als Spannungsabfall der Last sein.

$$u_c = u_1 > u_2 = i_2 Z_L \quad (\text{damit } i_C = i_1 - i_2 = C du_1/dt = \text{negativ})$$

$$u_1 > u_2 \quad \text{für Gleichgewicht wird } \overline{u_1 i_1} = \overline{u_2 i_2} \text{ und somit } i_2 > i_1$$

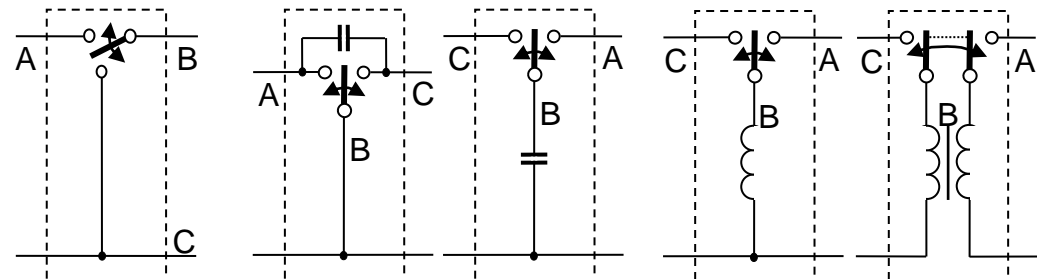


→ obere Variante → **Aufwärtswandler** (Hochsetzsteller mit Spannung ↑)
 → untere Variante → **Abwärtswandler** (Tiefsetzsteller mit Spannung ↓)

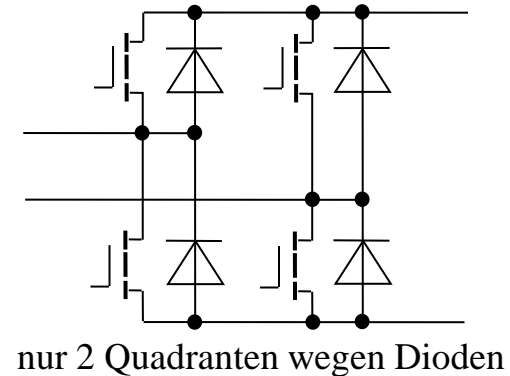
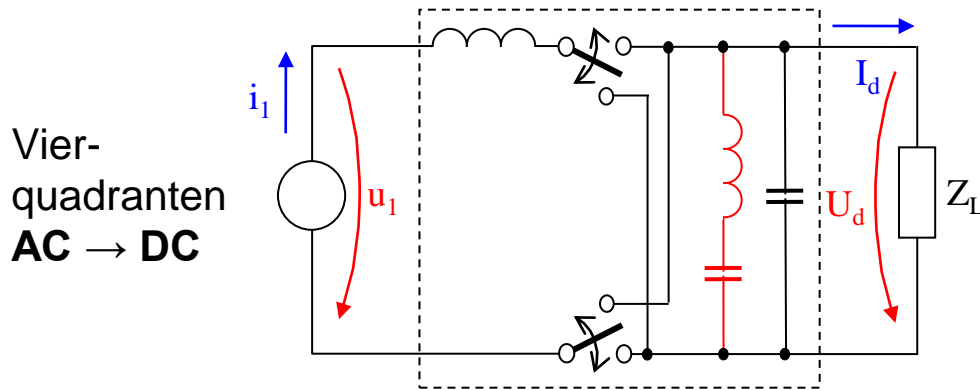
Ideale Schalter und Glättungselemente → keine Leistungsverluste $\overline{P}_1 = \overline{P}_2$ →
 völlig analog idealer Transformator

Reale Schalter und Glättungselemente → **Leistungsverluste durch Wandler**,
 die speisende Seite aufbringen muss.

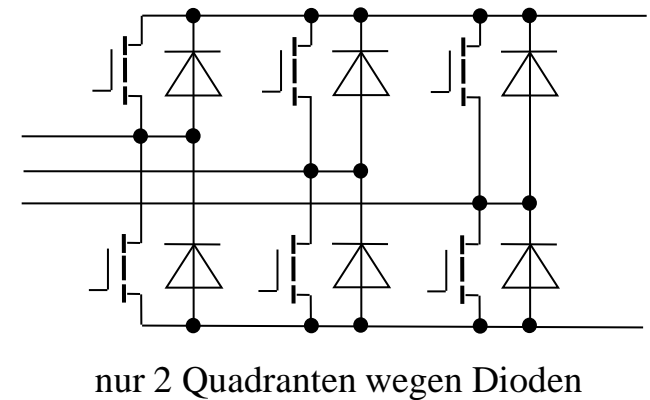
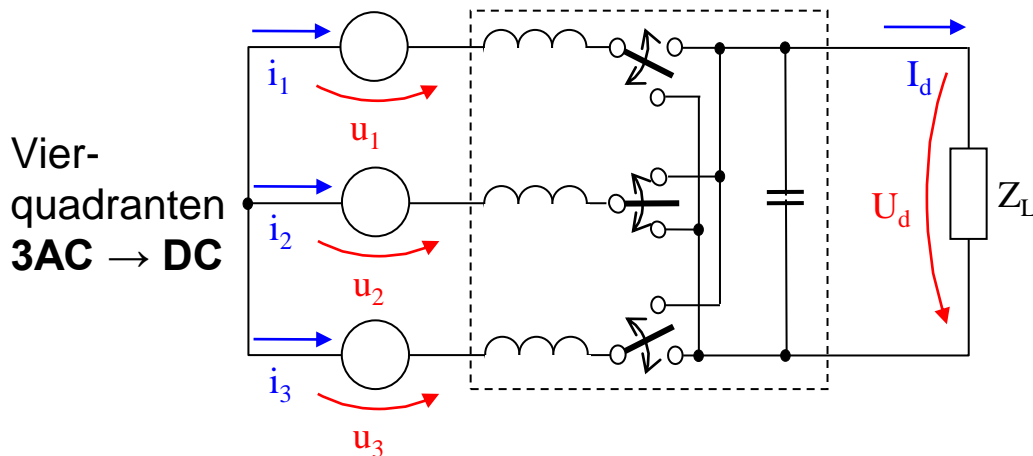
Drehen, Vertauschen
 des Schaltervierpols
 → **Schaltungsvarianten**



Wechsel- und Drehstromquellen sowie -lasten → zusätzliche Kommutierungen



Schaltung hat **vier Schaltzustände** (beide Kurzschlüsse identisch)
 → nach momentaner Polung von u_1 → Lastseite richtig gespeist
 $p(t)$ → Wechselstromseite nicht konstant, Gleichstromseite konstant
 → Saugkreis für doppelte Netzfrequenz (bei $2f_N \ll f_{Takt}$)



Schaltung hat **acht (7) Schaltzustände**, $p_{ges}(t)$ für 3AC konstant

3AC → **3AC** (Dreiphasendirektumrichter) → drei Dreifachumschalter

→ 18 vollgesteuerte Ventile → 27 Schaltzustände (davon 18 nutzbar)

Umschaltstrategie für solche Stromrichter + schnelle Steuerung (z.B. i_E, u_A)

+ hohe Taktfrequenzen + schnelle Reaktion auf Veränderungen (Regelung)

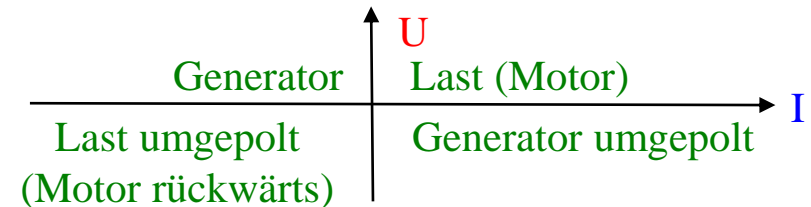
→ sehr komplex → Echtzeitverarbeitung im Bereich einiger μs .

→ Einsatz von Varianten mit Zweiquadrantensteuerung

→ Einsatz von ungesteuerten Gleichrichtern

→ Einsatz von Zwischenkreisumrichtern

Vierquadrantenbetrieb



Last – Gleichrichterbetrieb AC → DC

ungesteuert, Phasenanschnittsteuerung, sinusförmige Steuerung (Strom || Spannung)

Last – Umrichterbetrieb bei AC → AC

(nur gesteuert Zwischenkreisumrichter oder Direktumrichter)

Generator – Wechselrichterbetrieb bei DC → AC

nur gesteuert möglich, (Phasenanschnittsteuerung, sinusförmige Steuerung)

Generator – Umrichterbetrieb bei AC → AC

nur gesteuert als Zwischenkreisumrichter (oder Direktumrichter)

Umgepolte Last und **umgepolter Generator** → das Gleiche noch einmal

vollgesteuerte Ventile → Stromrichtersteuerung allein durch Steuerstrategie

Einteilung von Stromrichtern :

- Nach der Art der **Schaltung**
 - Mittelpunktschaltung (2-, 3- Pulsschaltung),
 - Brückenschaltung (4-, 6-, 12- Pulsschaltung),
- Nach der **Steuerung**
 - ungesteuert,
 - halbgesteuert,
 - vollgesteuert,
- Nach der **Betriebsart**
 - Einquadrantenbetrieb,
 - Zweiquadrantenbetrieb,
 - Vierquadrantenbetrieb,
- Nach dem **Löschvorgang**
 - netzgelöscht,
 - selbstgelöscht,
- Nach der Art der **Ventile**
 - ungesteuerte Ventile (Dioden),
 - nur einschaltbare Ventile (Tyristor, Triac),
 - ein- und ausschaltbare Ventile (GTO, Bipolartransistor, FET, IGBT),
- Nach der **Wirkungsweise**
 - Spannungswechselrichter (obere Quadranten),
 - Stromwechselrichter (rechte Quadranten),
- Nach **Direkt- oder Zwischenkreisumrichtern.**



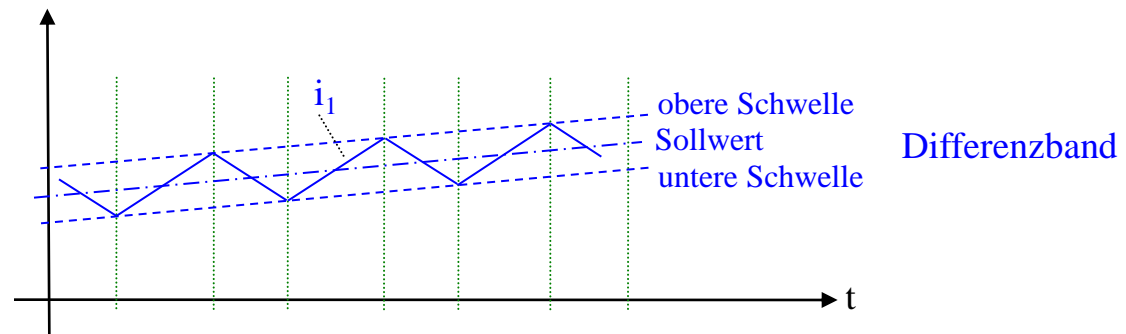
Zwischenkreisumrichter: Gleichrichter, Gleichstromzwischenkreis (z.B. Glättung) und anschließenden Wechselrichter

Direktumrichter: gesamte Umformung in einem Schritt mit einer Regelung (heute nur in untersynchronen Stromrichter-kaskaden)

Steueralgorithmen für selbstgesteuerte Stromrichter

Ventile selbstgesteuerter Stromrichter → ausschließlich von Steuerung gezündet sowie gelöscht. Synchronisation mit Netz → Steueralgorithmus

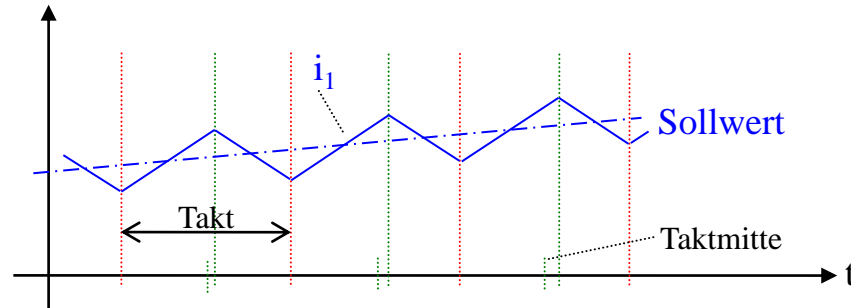
1. Differenzbandverfahren



Vorteile : Abweichungen Δi_1 unabhängig von Last nur infolge Differenzband
Solange Stromanstieg, -abfall linear, Mittelwert $i_{Ist} = i_{Soll}$
Das Verfahren ist relativ einfach realisierbar.

Nachteile: Taktfrequenz hängt von Last ab, ist nicht konstant. → Störfrequenzen sind variabel.

2. Verfahren mit fester Taktfrequenz

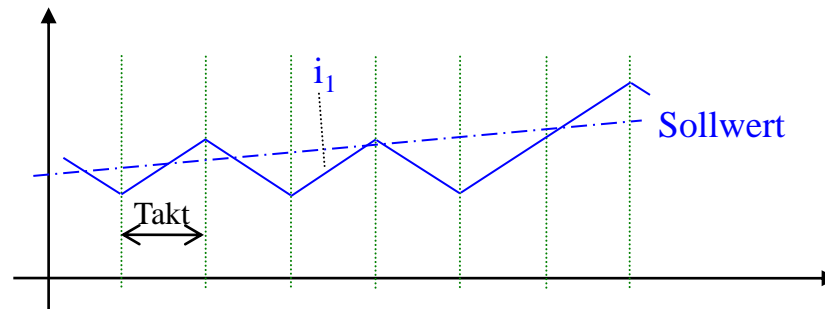


Taktbeginn immer Stromanstieg, Umschaltzeitpunkt aus i_{Soll} vorauskalkuliert
 Strom pendelt um den Sollstrom (z.B. einem sinusförmigen Sollstrom)

Vorteile : Taktfrequenz unabhängig von Last **konstant** → **Störfrequenzen fest**
 Solange Stromanstieg, -abfall linear, Mittelwert $i_{\text{Ist}} = i_{\text{Soll}}$

Nachteile: **Abweichungen** Δi_1 von Last **abhängig**
 Verfahren benötigt schnelle Berechnungen oder übergeordnete Regelung.

3. Feste Taktfrequenz für jede Umschaltung



Bei jedem Taktbeginn Entscheidung: Anstieg oder Abfall danach ob Sollstrom über- oder unterschritten (Komparator)

Vorteile : Taktfrequenz unabhängig von Last konstant → Störfrequenzen fest
Das Verfahren ist relativ einfach realisierbar.

Nachteile: Abweichungen Δi_1 von Last abhängig.

Mittelwert i_{Ist} nur im Mittel über viele Takte gleich i_{Soll}

→ exakte Regelung auf Sollwert (wie beim PI-Regler) ist mit Stromrichtern nicht möglich

strukturumschaltender Regler (nichtlineare Regelungstechnik)

Regel- und Schaltstrategie → Istwert pendelt eng um Sollwert

Ausfall der Steuerung → aktueller Zustand bleibt → ungünstiger Fall → Zerstörung

Mittelwertbildung über quasistationären Zeitraum

→ Verfahren der linearen Regelungstechnik

→ Spannungsregelung $U_{Aus} = const$ ermittelt den Sollstrom und unterlagerter Regelung i_{Ein} muss die Steuerung der Ventile durchführen

Bei Inselbetrieb ist immer ein selbstgesteuerter Stromrichter erforderlich.

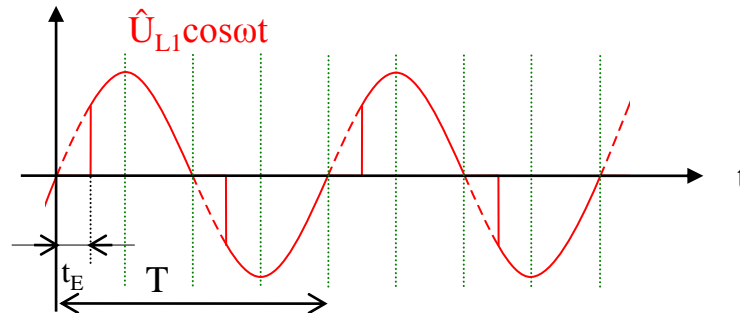
Bei Netzparallelbetrieb muss Steuerung Synchronisation sicherstellen.

Steueralgorithmen für fremdgesteuerte Stromrichter

Fremdgesteuerte Stromrichter → Ventile zumindest **vom Nulldurchgang des Netzes gelöscht**. → Synchronisation mit Netz erfolgt zwangsläufig.

Netzgelöschte Stromrichter für **Wechsel- und Drehstrom** nutzbar benötigen nur **Ansteuerung** zum **Zünden** der Ventile, d.h. Steuerung → Zündzeitpunkt.
(Ungesteuerte Gleichrichter, die von selbst zünden sind auch fremdgesteuert.)

Zündzeitpunkt nach der Phasenanschnittsteuerung



t_E nach Nulldurchgang Zündung, Ventilstrom = 0 → automatisch Löschen
Festlegung t_E durch Zeitverzögerung mit Timerbaustein oder Kondensatorladung

Vorteile : Natürliche **Synchronisation** auf Netzfrequenz.

Das Verfahren ist sehr **einfach** realisierbar.

Nachteile: Nur **ein** Einschalten pro Halbwelle → **keine Sinusform**

Nichtsinusförmige Schwingungen → **viele Störungen** (Oberschwingungen)

Bei **Netzausfall** ist **kein Betrieb** möglich.

Induktivitäten (bzw. Kapazitäten) → Löschen bei **Stromnulldurchgang nicht** bei **Spannungnulldurchgang**

Zündung nur, wenn das betreffende **Ventil** aufgrund der momentanen Spannung **Strom führen kann**.

Löschen so, dass **Freiwerdezeit** der Ventile ausreicht.

Netzgelöschter Wechselrichter → in der Regel Stromwechselrichter
→ folgendes Ventil übernimmt Strom → Freilaufdioden entfallen.

Als Stellglied oder Regler → allein Beeinflussung des Zündzeitpunktes

Aufgabe 3.1.1

Die Phasenanschnittsteuerung soll für $\hat{U} = 325 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$ und $t_E = 3 \text{ ms}$, 5 ms und 8 ms durchgeführt werden.

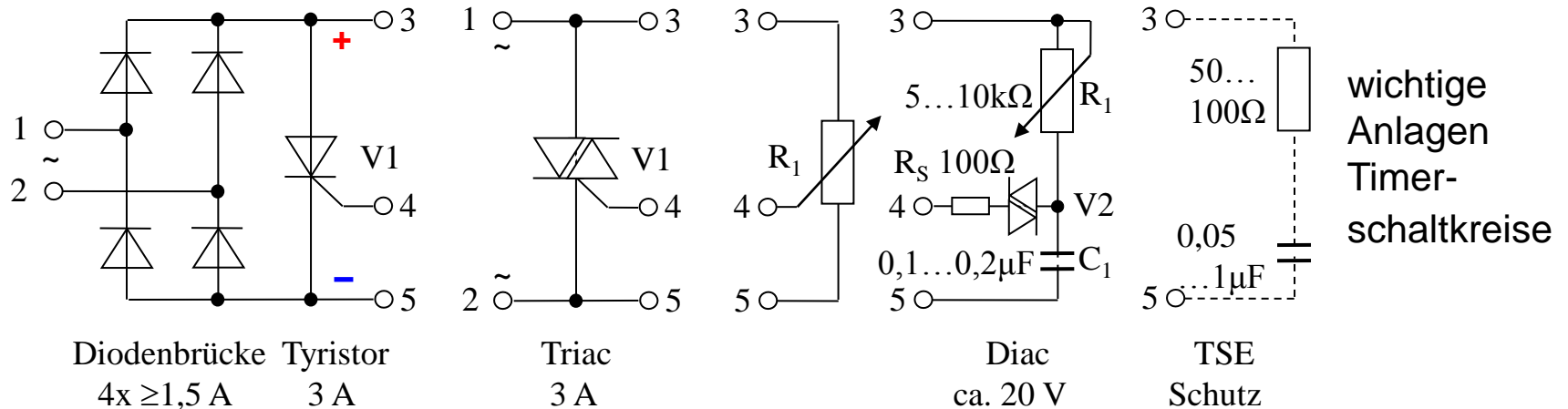
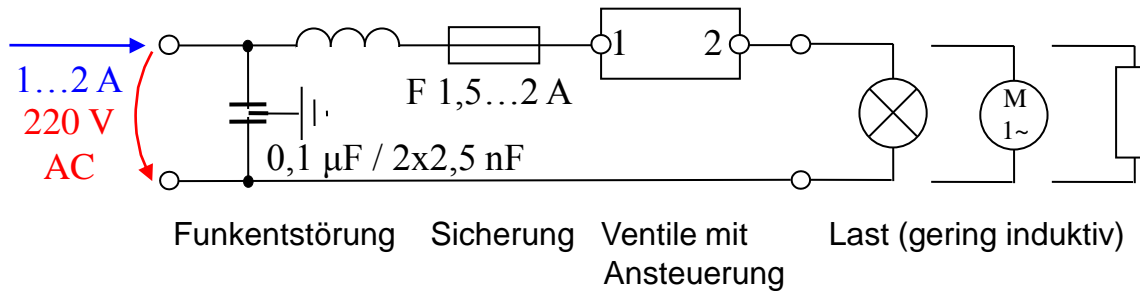
Frage: Wie sehen für rein Ohm'sche Last mit $R = 100 \Omega$ die Ströme aus?

Zusatzfrage: Wie sehen die Ströme qualitativ für eine Reihenschaltung von L und R aus?

3.2 Beispiele für Stromrichter

Phasenanschnittsteuerung

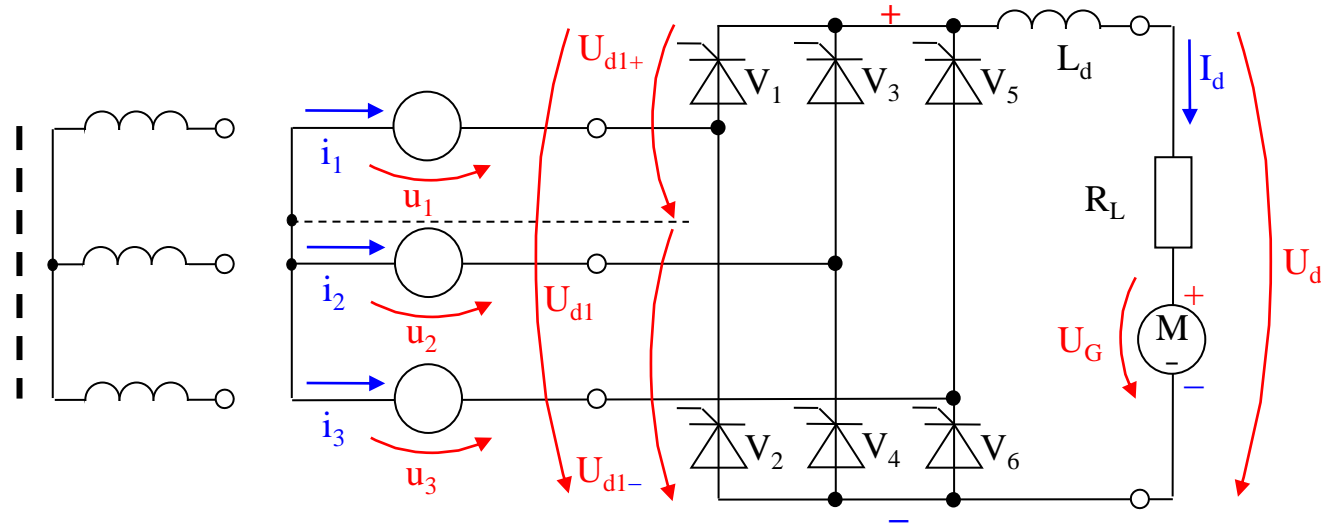
(Dimmer für eine Lichtregelung, Drehzahlstellung von Universalmotoren...)



Wechselstromsteller → U von 20 ... 220 V (von 230 V) → Leistung stellen → positive und negative Halbwellen (Thyristor, eine Richtung → Gleichrichterbrücke)
 Heute **Triacs** → beide Richtungen
 Eingangsseite **erster u. dritter Quadrant**, Gleichstromseite **Einquadrantenbetrieb**.

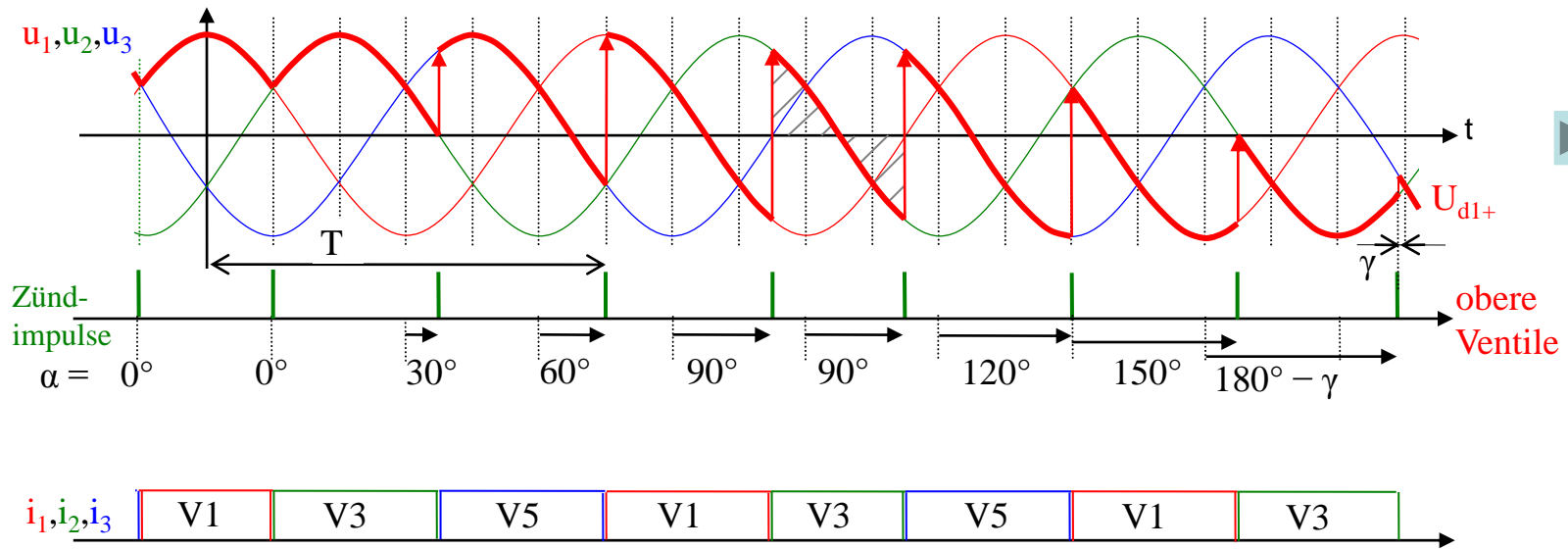
- **induktive Last** (Universalmotor) → Strom nach Spannungsnulldurchgang
→ bei Stromnulldurchgang schneller Spannungsanstieg → **Trägerstauereffekt**
(Zeit reicht nicht zum Abfließen der Ladungsträger → leitet weiter) → **TSE- Beschaltung**
- Schutz der Ventile → **flinke Sicherung**
- Zusätzlich unbedingt **Funkentstörung**

Netzgelöschter Wechselrichter



- **Stromwechselrichter** → nur eine Stromrichtung durch Ventile → ~~Freilaufdioden~~
- L_d so groß angenommen → Strom I_d völlig konstant
- nachfolgendes Ventil bei „+“ → **Übernahme**, nur wenn **höhere positive Spannung**
- bei $\alpha = 180^\circ$ → zur Sicherheit um Löschwinkel γ vorher

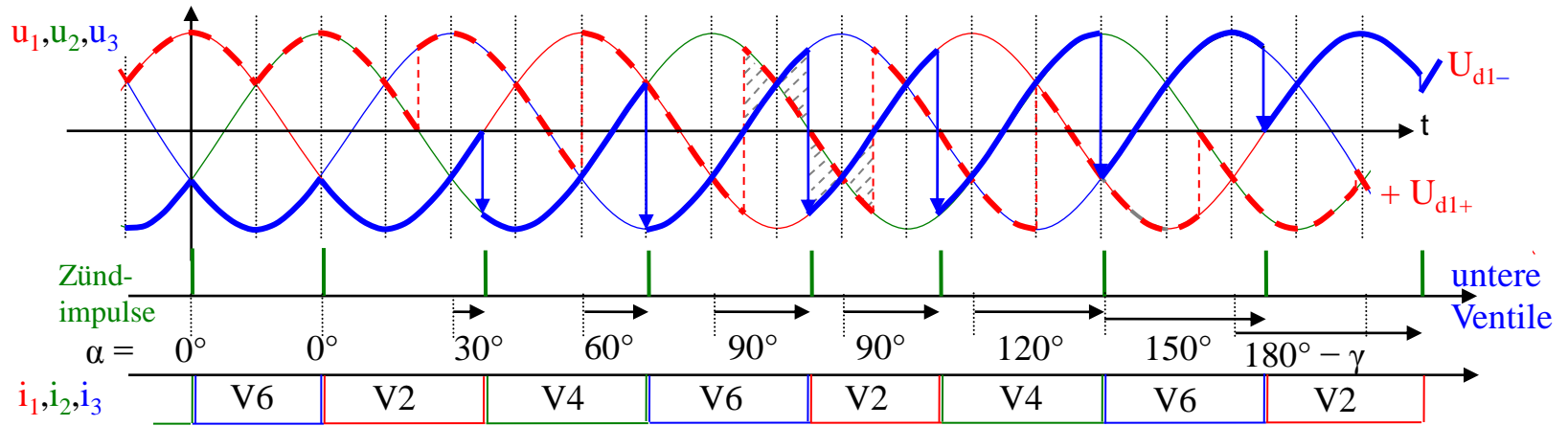
Analyse von Antriebsprozessen, deren Steuerung sowie von Prozessen der Energiewandlung



- kleines α** $\rightarrow U_{d1+}$ genau jeweilige Maxima \rightarrow Energie von Dreiphasenquelle
- $> 30^\circ$ \rightarrow Spannung etwas ins Negative
- 90° \rightarrow Mittelwert Null \rightarrow Energie zwischen Dreh- und Gleichquelle hin, her
- $> 90^\circ$ \rightarrow im Mittel negativ
- $180^\circ - \gamma$ \rightarrow größten negativen Mittelwert, Energie von Gleichspannungsquelle
(entspricht bei Fahrzeugen Rückspeisen beim Bremsen)

Ventile unten (bei U_{d1-})

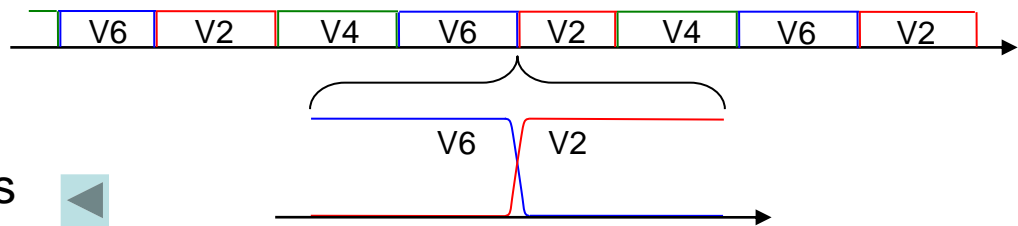
nachfolgendes Ventil bei „-“ \rightarrow **Übernahme**, nur wenn **höhere negative** Spannung



- Spannung zwischen „+“ und „-“ zu jedem Zeitpunkt $U_{d1} = U_{d1+} + U_{d1-}$
- 90° wieder der schraffierte Bereich \rightarrow im Mittel Null
- U_{d1} mit Vergrößerung Zündverzögerung \rightarrow im Mittel kleiner, dann Null und dann zunehmend negativ
- Spannungsunterschied zwischen U_{d1} und U_d muss Induktivität tragen
- Strom muss (bei großen Induktivität gering $\leftarrow L di/dt$) zu- bzw. abnehmen
- Induktivität \rightarrow Speicher für die Mittelwertbildung
- Strom fast konstant $\rightarrow R_L I_d$ fast konstant und somit $U_d \approx \text{const}$

Stromübernahme in der Praxis innerhalb einiger μs

Kippen des Wechselrichters

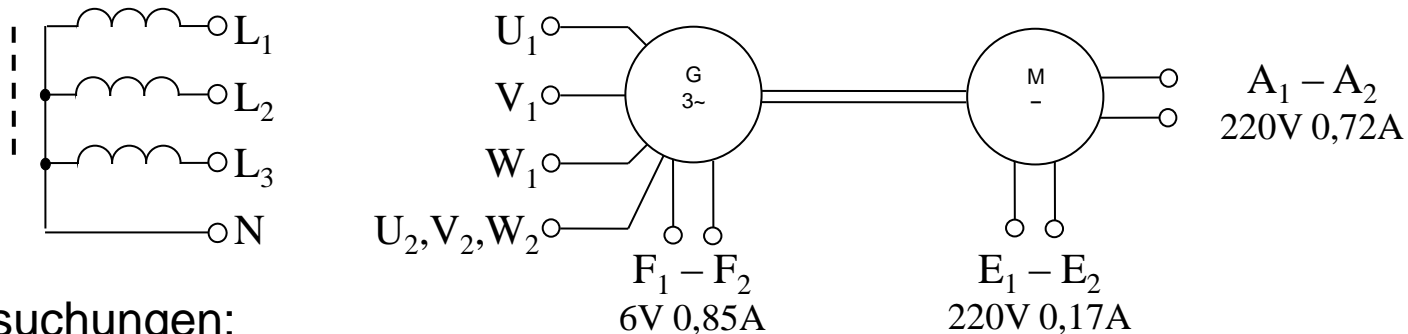


4. Projektaufgaben

4.1 Parallelbetrieb eines Synchrongenerators zum Netz

Maschinensatz mit Antriebsmaschine (Gleichstrommotor/-generator) und Stromerzeuger (Synchrongenerator/-motor) soll auf das Netz synchronisiert werden.

- Vorrichtung zum Anzeigen der Synchronität zwischen Generator und Netz,
- Vorrichtung zum Zuschalten der Synchronmaschine zum Netz
- Messschaltung zur Messung von Wirk-, Scheinleistung und $\cos\varphi$ zu erarbeiten und aufzubauen.



Untersuchungen:

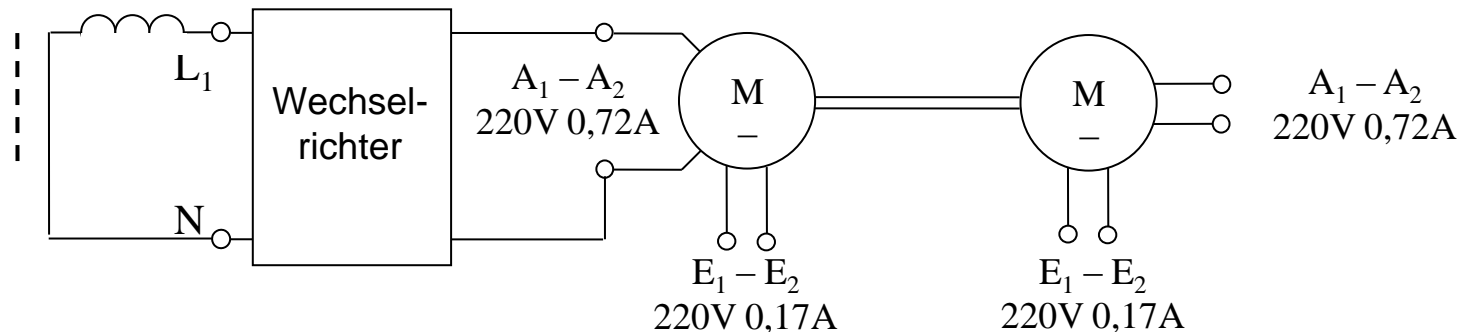
- Einspeisung von kapazitiver und induktiver Blindleistung,
- Einspeisung von Wirkleistung,
- Motorbetrieb mit reiner Wirkleistung sowie
- Motorbetrieb mit kapazitiver und induktiver Blindleistung

Ergebnisse für eine Lernstation aufbereiten und erproben

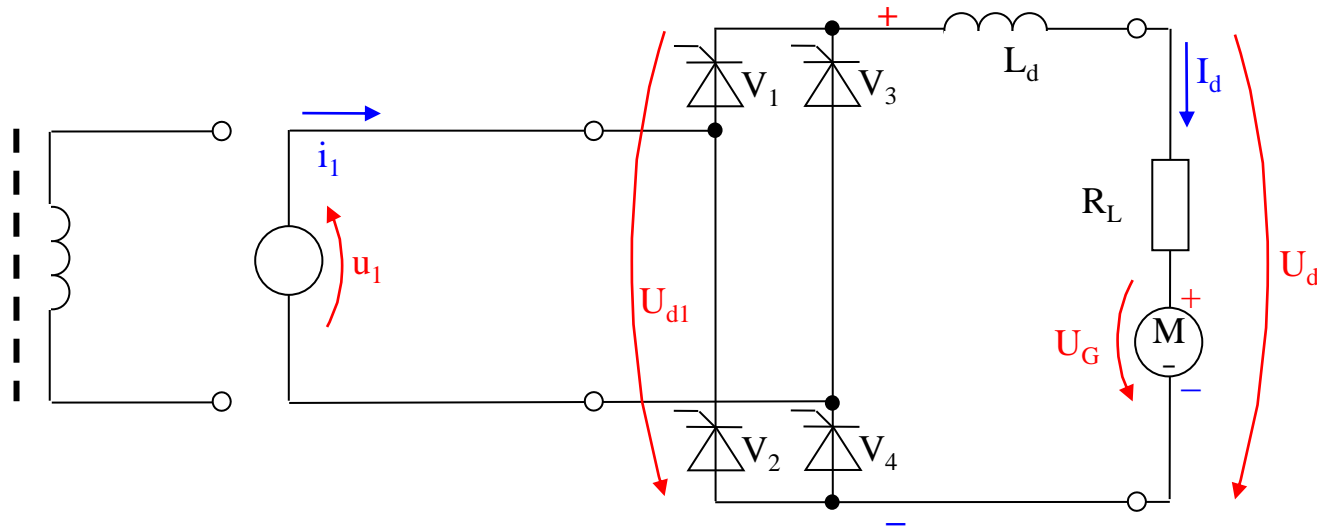
4.2 Wechselrichter für Zweiquadrantenbetrieb

Maschinensatz mit Antriebsmaschine (Gleichstrommotor/-generator) und Stromerzeuger (Gleichstromgenerator /-motor) soll mit Wechselrichter Energie in Wechselstromnetz einspeisen.

- netzgeführter Stromwechselrichter konzipieren (Dazu Simulation des Wechselrichters),
- Maschinensatz vorbereiten
- Messschaltung zur Messung von Wirk-, Scheinleistung und $\cos\varphi$ erarbeiten und aufbauen.



Einphasenstromwechselrichter für Zweiquadrantenbetrieb



Untersuchungen:

- Gleichrichterbetrieb mit $\alpha = 0^\circ$ bis 90° (Motorbetrieb mit Leistungsentnahme aus Wechselstromnetz)
- Wechselrichterbetrieb mit $\alpha = 90^\circ$ bis $180^\circ - \gamma$ (Einspeisen von Leistung des Gleichstromgenerators ins Wechselstromnetz)

Ergebnisse für eine Lernstation aufbereiten und erproben