

# Vorlesung Elektrische Maschinen und Stromrichter

WS 2019/20

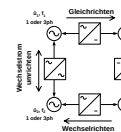
Elektrotechnisches Institut (ETI) – Leistungselektronische Systeme



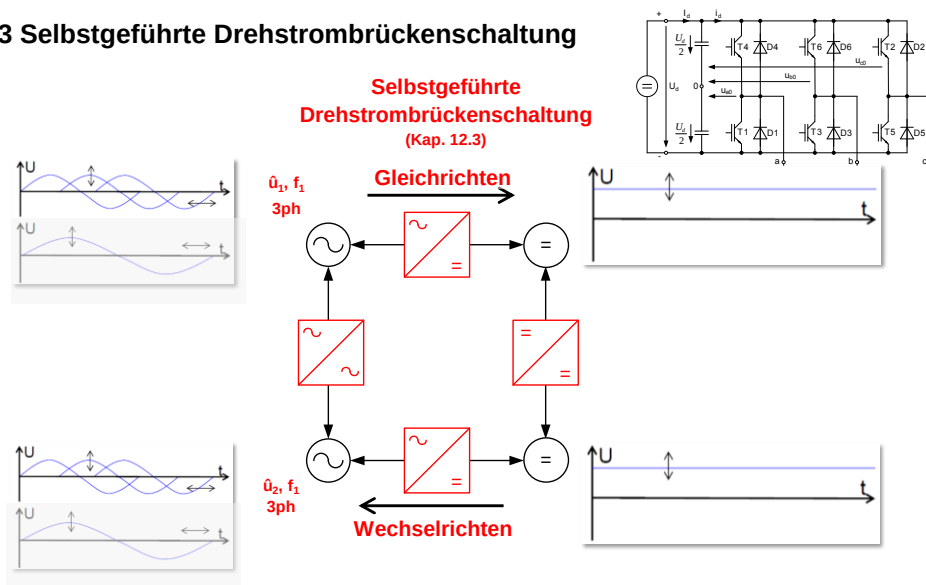
www.kit.edu

## Vorlesungsinhalte

- Kapitel 1: Vorbemerkung
- Kapitel 2: Einleitung
- Kapitel 3: Magnetische Kräfte und Induktion
- Kapitel 4: Gleichstrommaschine
- Kapitel 5: Schrittmotor
- Kapitel 6: Drehstromsynchronmaschine
- Kapitel 7: Asynchronmaschine
- Kapitel 8: Transformator
- Kapitel 9: Leistungshalbleiter
- Kapitel 10: Stromrichter
- Kapitel 11: Netzgeführte Stromrichter
- Kapitel 12: Selbstgeführte Stromrichter**
- Kapitel 13: Elektrische Antriebe



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

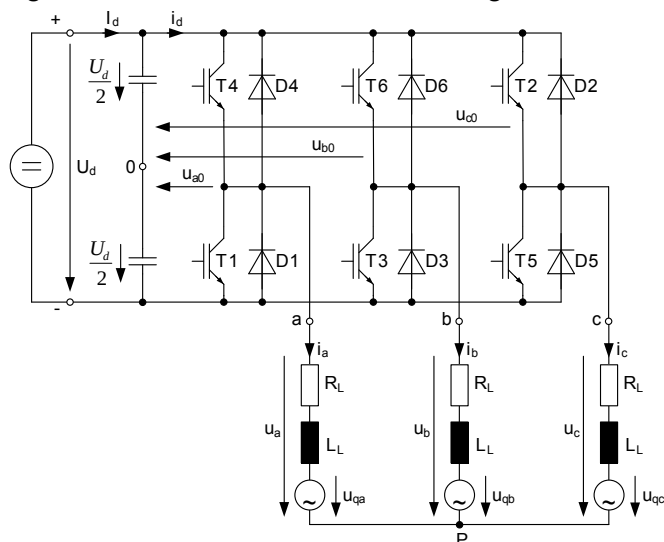


Abbildung 94: Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung mit aktiver ohm'sch-induktiver Last  
a) Prinzipschaltbild

## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

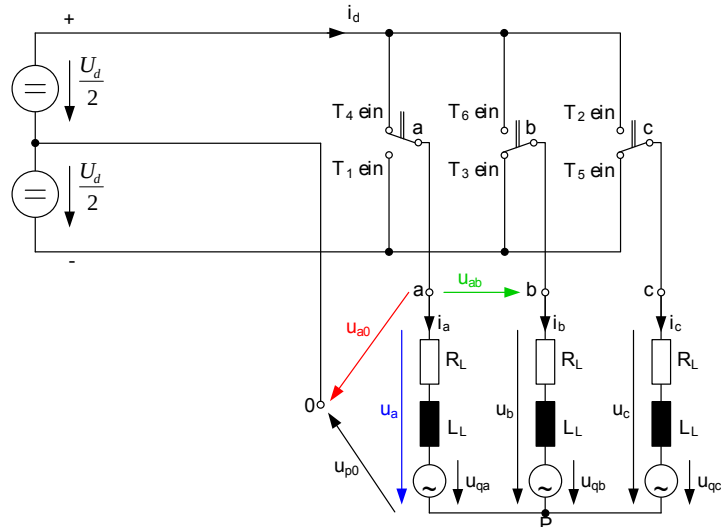


Abbildung 94: Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung mit aktiver ohm'sch-induktiver Last  
b) Idealisiertes Schaltermodell

## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

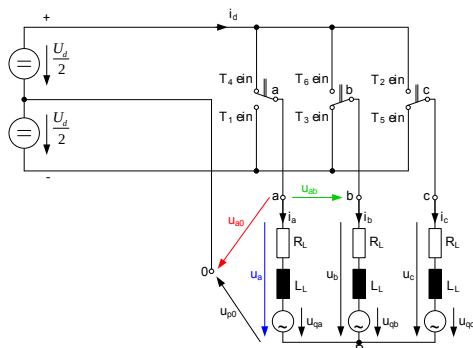
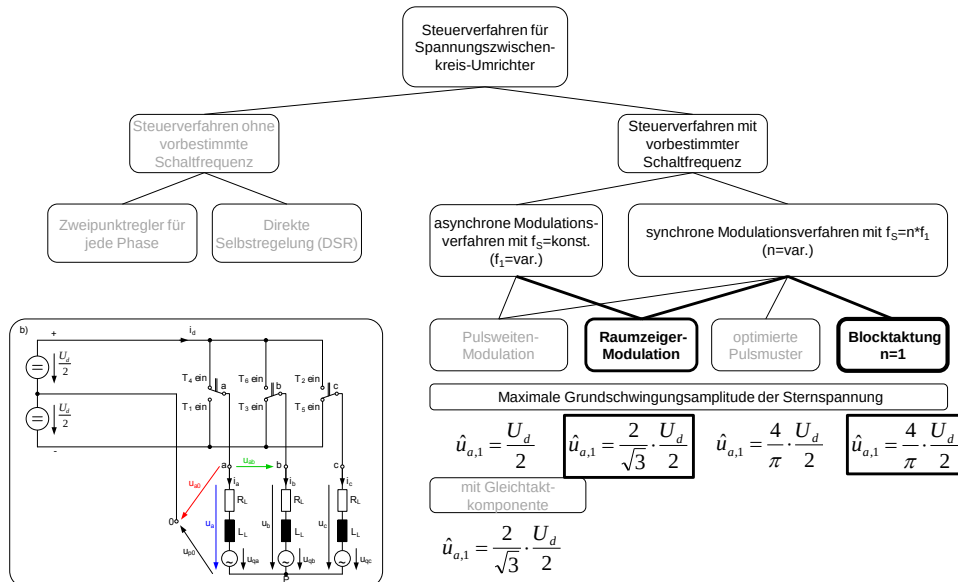


Abbildung 94:  
Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung mit aktiver ohm'sch-induktiver Last  
b) Idealisiertes Schaltermodell

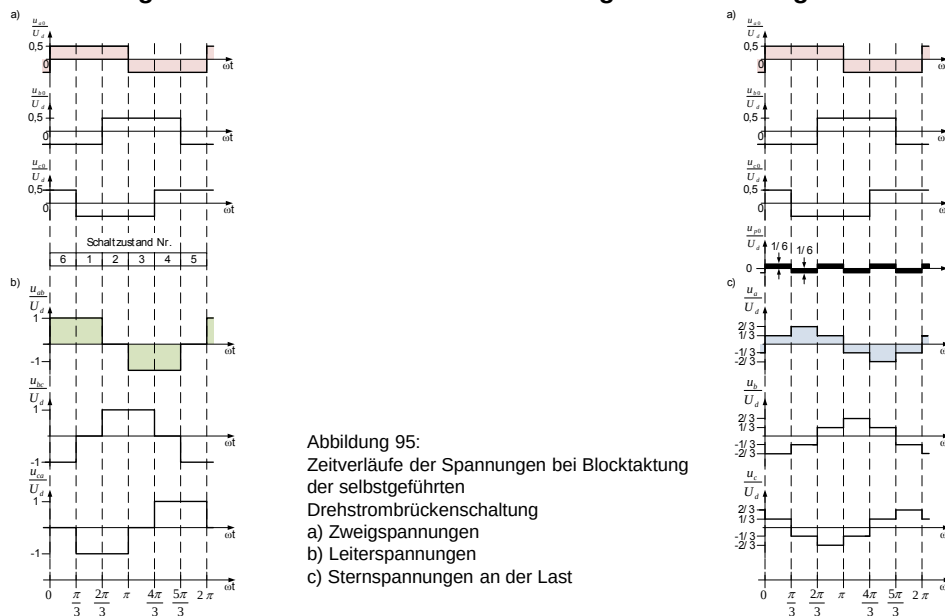
| Nr. | Schaltfunktion |       |       | Leiter-<br>spannungen |                      |                      | Stern-<br>spannungen |                   |                   | Gleichtakt-<br>spannung |
|-----|----------------|-------|-------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|     | $S_a$          | $S_b$ | $S_c$ | $\frac{u_{ab}}{U_d}$  | $\frac{u_{bc}}{U_d}$ | $\frac{u_{ca}}{U_d}$ | $\frac{u_a}{U_d}$    | $\frac{u_b}{U_d}$ | $\frac{u_c}{U_d}$ | $\frac{u_{p0}}{U_d}$    |
| 1   | 1              | -1    | -1    | 1                     | 0                    | -1                   | 2/3                  | -1/3              | -1/3              | -1/6                    |
| 2   | 1              | 1     | -1    | 0                     | 1                    | -1                   | 1/3                  | 1/3               | -2/3              | 1/6                     |
| 3   | -1             | 1     | -1    | -1                    | 1                    | 0                    | -1/3                 | 2/3               | -1/3              | -1/6                    |
| 4   | -1             | 1     | 1     | -1                    | 0                    | 1                    | -2/3                 | 1/3               | 1/3               | 1/6                     |
| 5   | -1             | -1    | 1     | 0                     | -1                   | 1                    | -1/3                 | -1/3              | 2/3               | -1/6                    |
| 6   | 1              | -1    | 1     | 1                     | -1                   | 0                    | 1/3                  | -2/3              | 1/3               | 1/6                     |
| 7   | 1              | 1     | 1     | 0                     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                 | 0                 | 1/2                     |
| 8   | -1             | -1    | -1    | 0                     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                 | 0                 | -1/2                    |

Schaltzustände der selbstgeführten  
Drehstrombrückenschaltung

## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Blocktaktung



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Blocktaktung

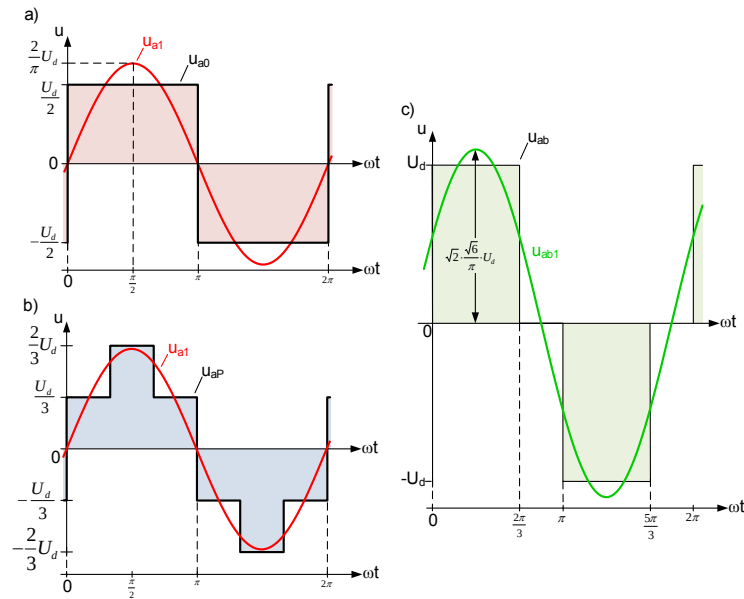


Abbildung 96:  
Zeitverläufe einer  
a) Zweigspannung  
b) Sternspannung der Last  
c) Leiterspannung  
und der zugehörigen  
Grundschiwingung bei  
Blocksteuerung

## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Freilaufzustände

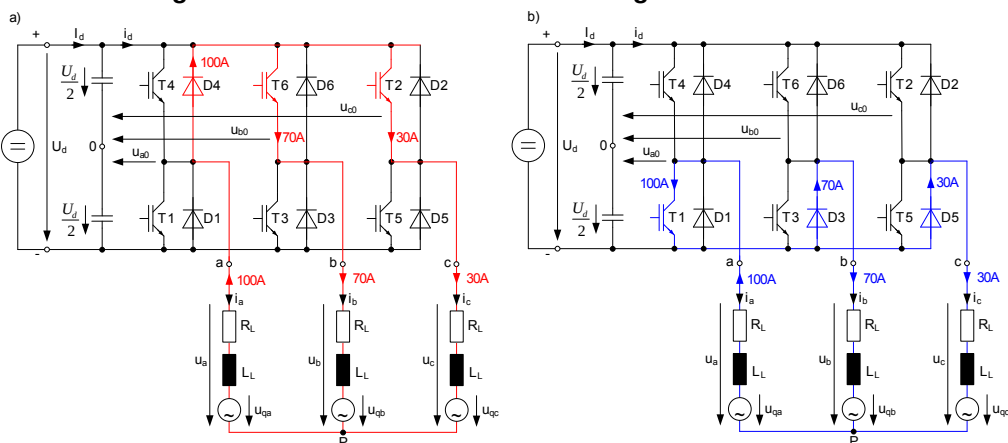
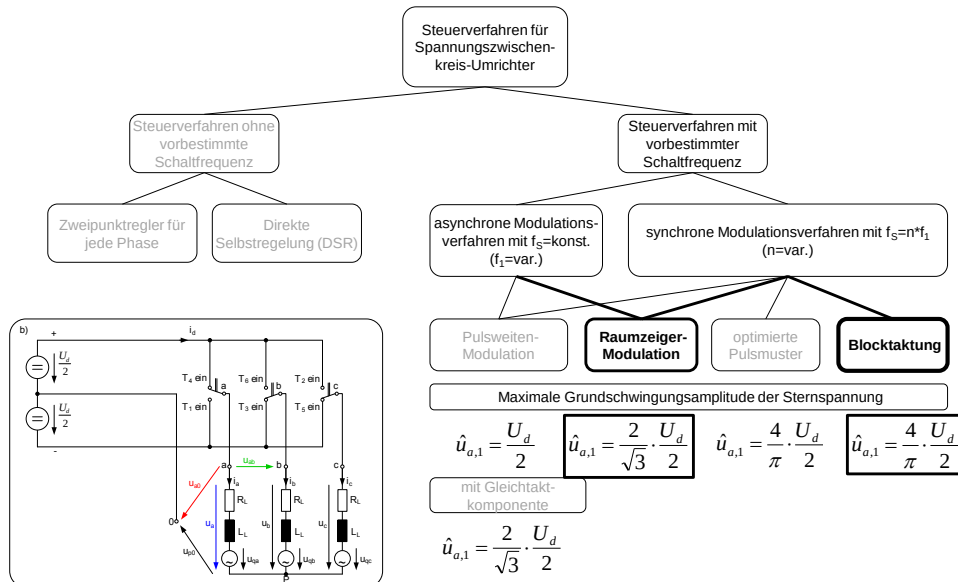


Abbildung 97:  
Stromverteilung in der selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung für den  
a) Schaltzustand 7 (Freilauf über die obere Brückenhälfte)  
b) Schaltzustand 8 (Freilauf über die untere Brückenhälfte)  
für  $i_a = +100\text{A}$ ,  $i_b = +70\text{A}$ ,  $i_c = +30\text{A}$

## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

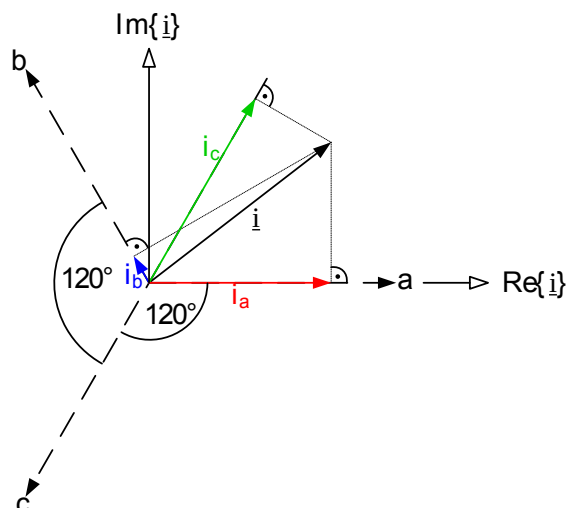


Abbildung 98:  
Darstellung der drei Strangströme  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  durch einen Raumzeiger  $\vec{i}$

## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Grundlage ist die Darstellung eines dreiphasigen Spannungssystems durch einen **Raumzeiger** in der komplexen Ebene:

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \left[ u_1 + \underline{a} \cdot u_2 + \underline{a}^2 \cdot u_3 \right] \quad \underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \left[ u_1 + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot u_2 + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot u_3 \right]$$

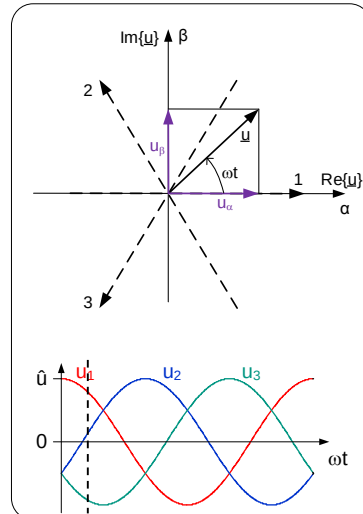
Der Raumzeiger kann mit den Komponenten  $u_\alpha$  und  $u_\beta$  in einem orthogonalen Koordinatensystem beschrieben werden:

$$\underline{u} = u_\alpha + j \cdot u_\beta \quad \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Gleichtaktkomponenten (Nullsystem) werden durch den Raumzeiger nicht dargestellt und müssen separat behandelt werden.

$$u_0 = \frac{1}{3} \cdot [u_1 + u_2 + u_3]$$

Bei symm. Drehspannungssystem:  $u_0 = 0$



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

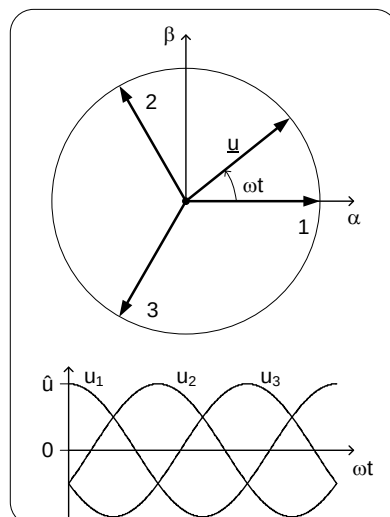
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems  $u_{1,2,3}(t)$



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

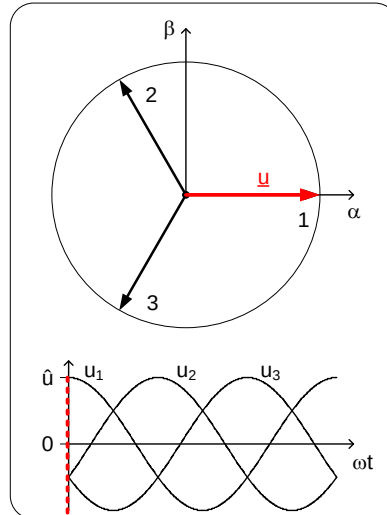
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\alpha} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems  $u_{1,2,3}(t)$



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

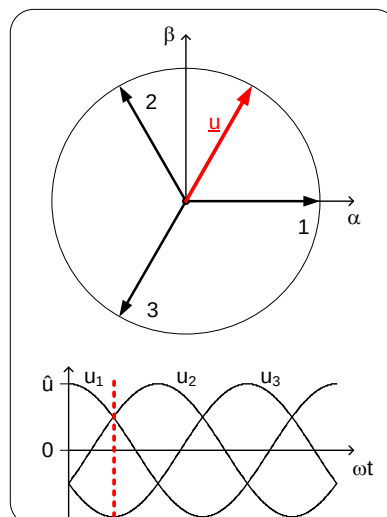
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\alpha} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems  $u_{1,2,3}(t)$





## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

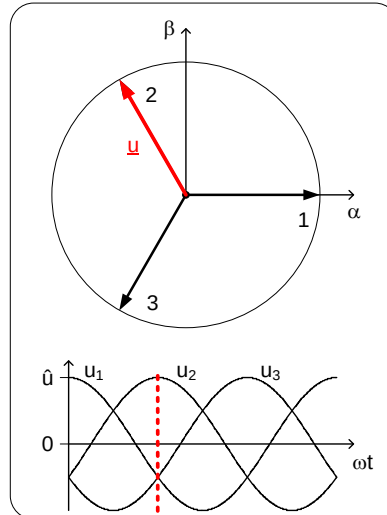
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\alpha} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems  $u_{1,2,3}(t)$



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

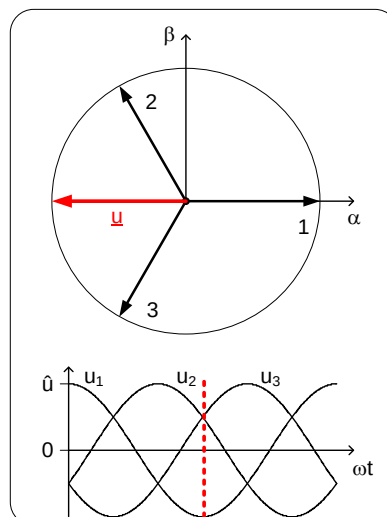
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\alpha} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems  $u_{1,2,3}(t)$



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

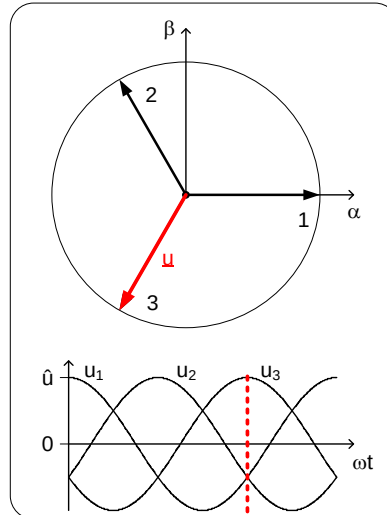
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\alpha} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems  $u_{1,2,3}(t)$



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

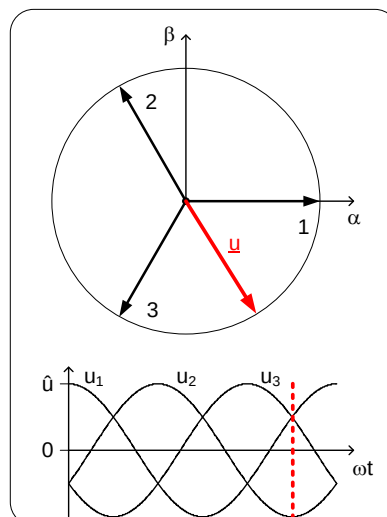
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\alpha} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems  $u_{1,2,3}(t)$



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

### Raumzeigerdarstellung

Sinusförmiges Drehspannungssystem:

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3} \cdot \pi\right)$$

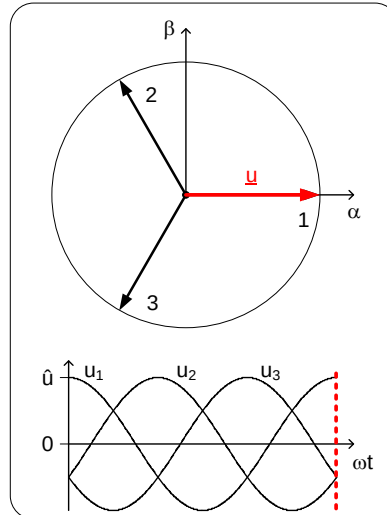
$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{4}{3} \cdot \pi\right)$$

Raumzeiger:

$$\underline{u} = \hat{u} \cdot e^{j\alpha} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$$

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Die Länge des Raumzeigers entspricht der Amplitude der Phasenspannungen des sinusförmigen Systems  $u_{1,2,3}(t)$



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

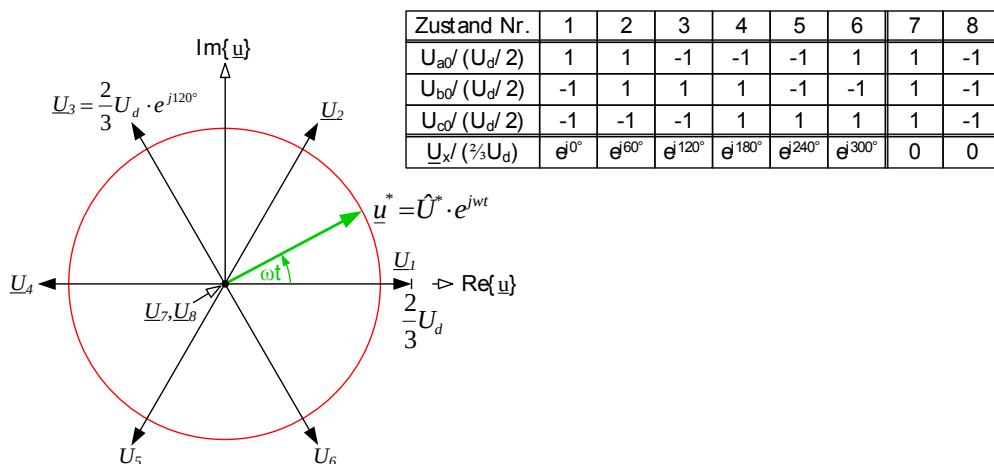
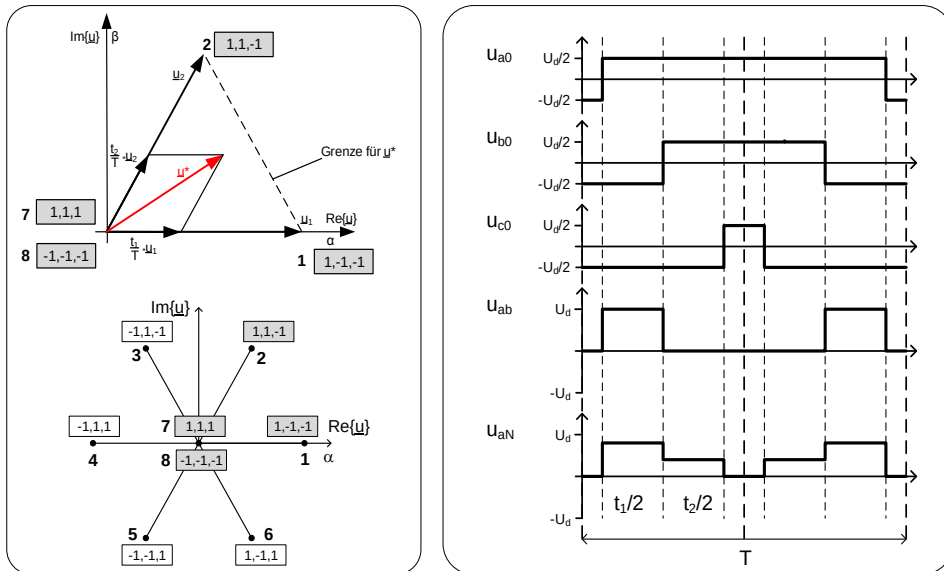


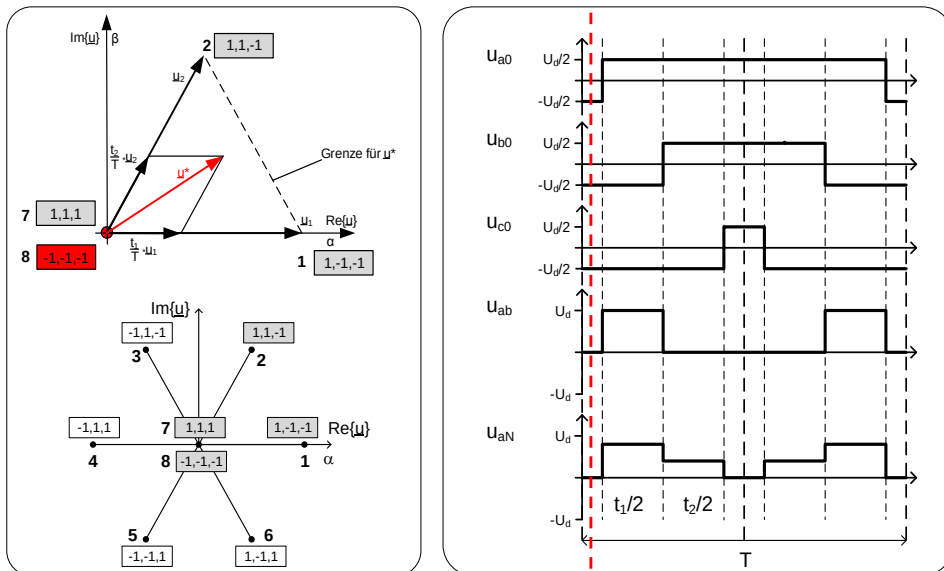
Abbildung 99:

Raumzeigerdarstellung der Spannungen  $u_{a0}$ ,  $u_{b0}$ ,  $u_{c0}$  für die Schaltzustände 1 bis 8, sowie Trajektorie des Raumzeigers eines sinusförmig symmetrischen Drehspannungssystems

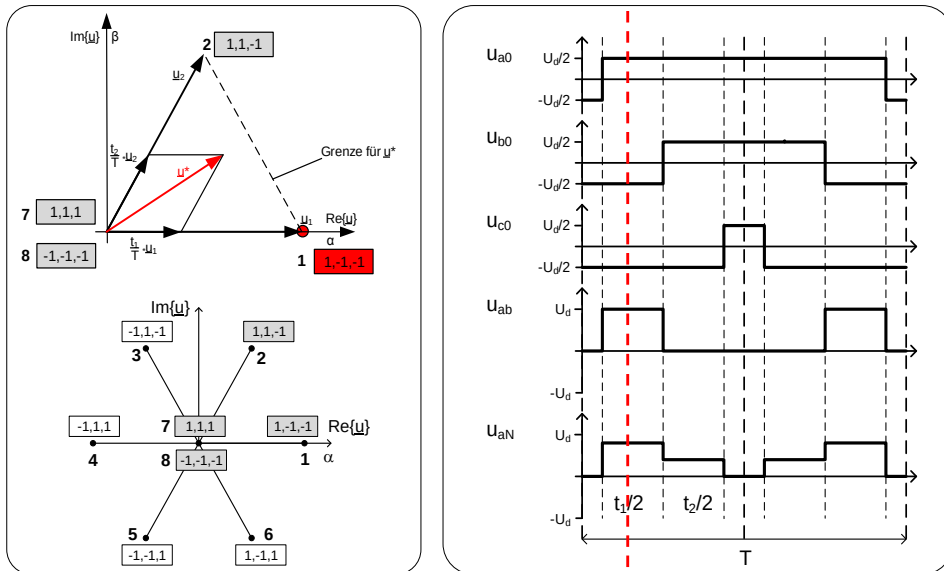
## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



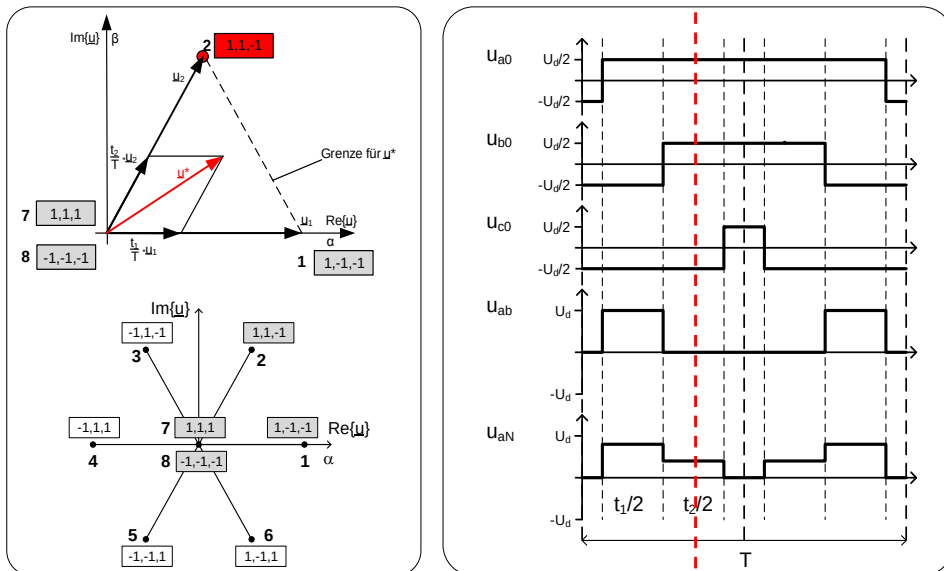
## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



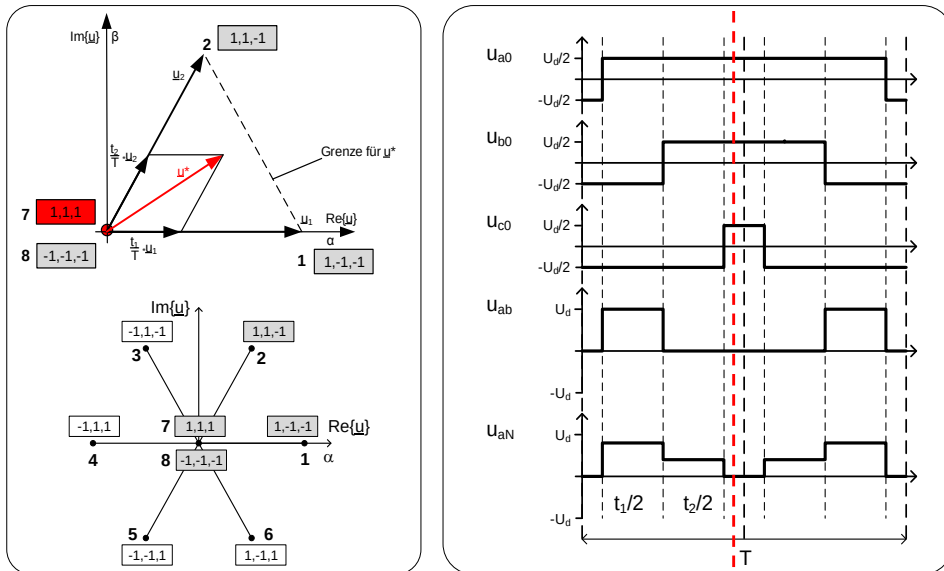
## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



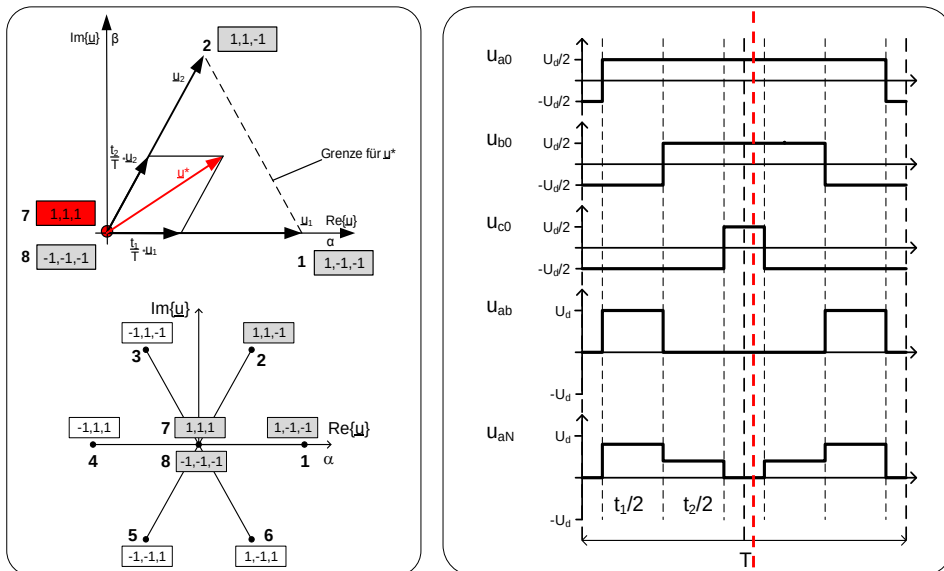
## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



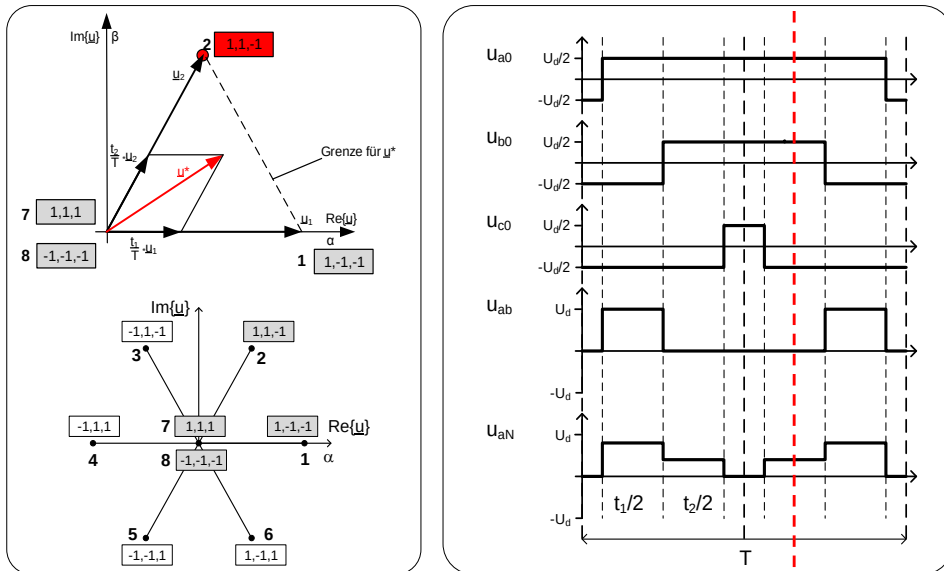
## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



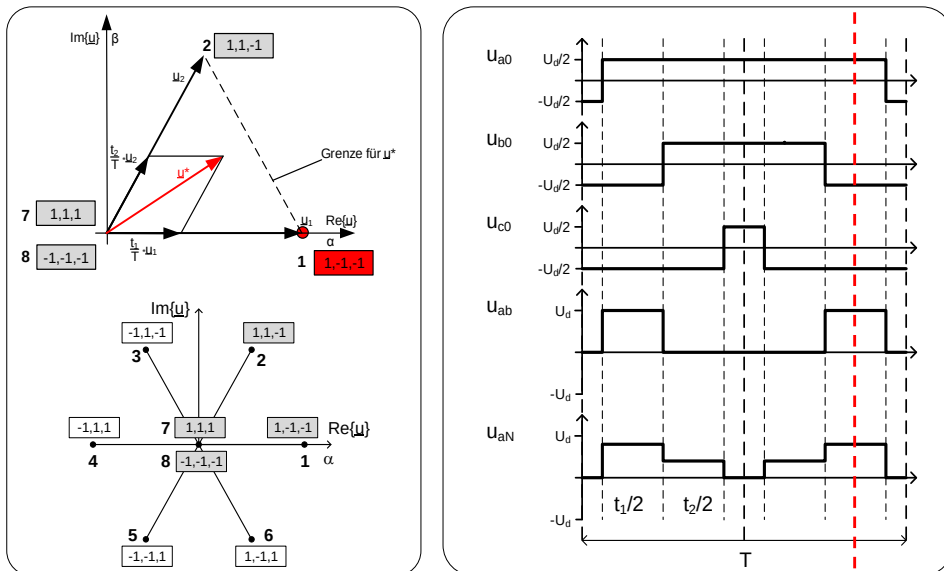
## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



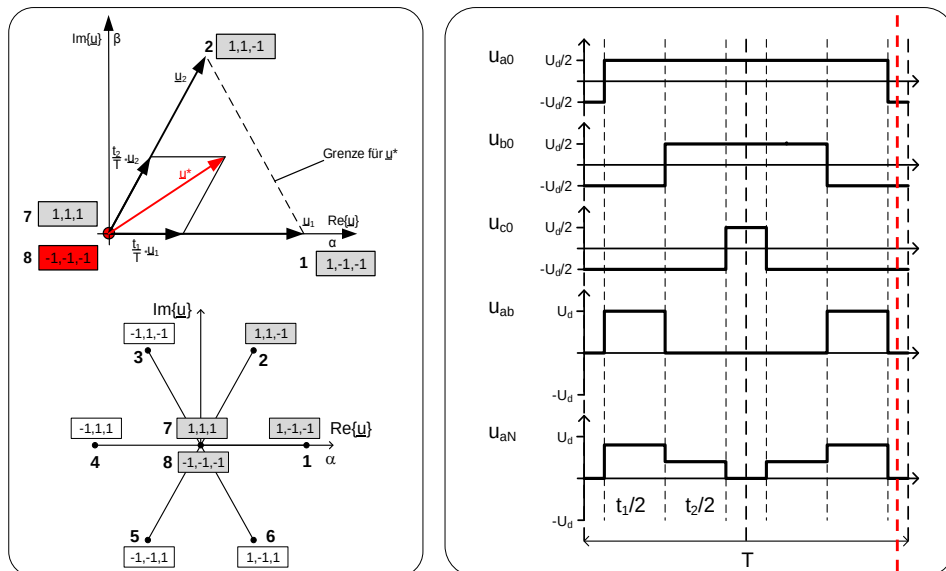
## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation



## 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

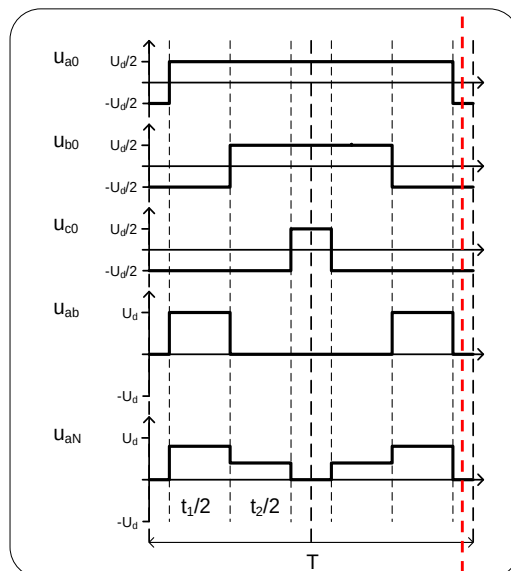
- Einstellung eines symmetrischen Spannungssystems durch Vorgabe einer kreisförmigen Bahnkurve
- Für eine quasikontinuierliche Approximation der (meist sinusförmigen) Spannungssollwerte wird eine sehr kurze Pulsperiode  $T$  betrachtet.

Durch geeignete Wahl der Einschaltzeiten für die Raumzeiger der einzelnen Schaltzustände kann der Sollspannungs-Raumzeiger näherungsweise eingestellt werden.

- „Kürzung“ der Raumzeiger durch zeitweises Einschalten der von Null verschiedenen Raumzeiger, z.B. durch Wechsel zwischen Raumzeiger 1..6 und Nullzeiger 7,8.
- „Summenbildung“ durch Abwechseln der von Null verschiedenen Raumzeiger 1..6.

Vorteilhaft:

- Nutzung der dem Sollspannungs-Raumzeiger benachbarten Raumzeiger (zwei von Null verschiedene Raumzeiger plus Nullzeiger),
- Wahl der Raumzeiger so, dass beim Wechsel nur ein Brückenarm schalten muss.





### 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

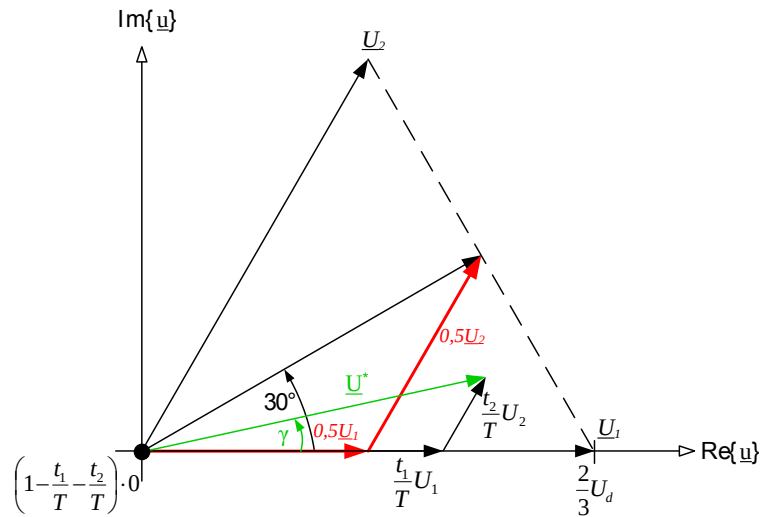


Abbildung 100:  
Darstellung des Raumzeigers  $\underline{U}^*$  durch die benachbarten Raumzeiger der Schaltzustände 1, 2 und 7, 8, sowie Grenzfälle für  $\gamma=30^\circ$

### 12.3 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung - Raumzeigermodulation

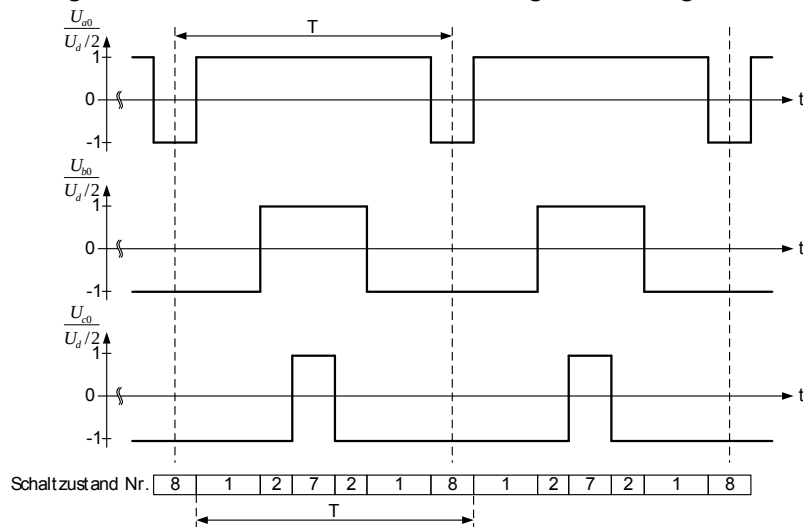


Abbildung 101:  
Darstellung zweier Pulsperioden der Raumzeigermodulation: Zweigspannungen  $u_{a0}$ ,  $u_{b0}$ ,  $u_{c0}$  und Schaltzustandsnummern für  $0 < \gamma < 30^\circ$  entsprechend Abb. 100