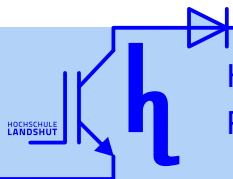


# Leistungselektronik

## Kapitel 6: Wechselrichter – Steuerverfahren und Pulsmuster

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier



# Leistungselektronik

## Aktuelles Kapitel

**Kapitel 1:** Einführung, Brainstorming, Übersicht  
**2:** Grundlagen netzgeführte Stromrichter  
**3:** Grundlagen selbstgeführte Stromrichter  
**4:** Leistungshalbleiterbauelemente

Einstieg:  
allgemeine  
Grundlagen

**Kapitel 5:** Wechselrichter 1: Topologie und Komponenten  
**6:** Wechselrichter 2: Steuerverfahren und Pulsmuster  
**7:** Wechselrichter 3: Dimensionierung und Simulation

zentrales  
Thema

**Kapitel 8:** Aufbautechnologie und Entwärmung  
**9:** Ansteuerung von Leistungshalbleitern  
**10:** Schaltvorgänge von Leistungshalbleitern  
**11:** Vermessung, Inbetriebnahme und Test

Technologie  
& Detailwissen

**Kapitel 12:** Spezielle Einsatzgebiete und Topologien – Referate

Vergrößerung  
Wissensbasis

# Leistungselektronik

## Übersicht

### Kapitel 6: Wechselrichter – Steuerverfahren und Pulsmuster

6.1 Sinus-Dreieck-Modulation

6.2 Halbbrücke

6.3 Vollbrücke

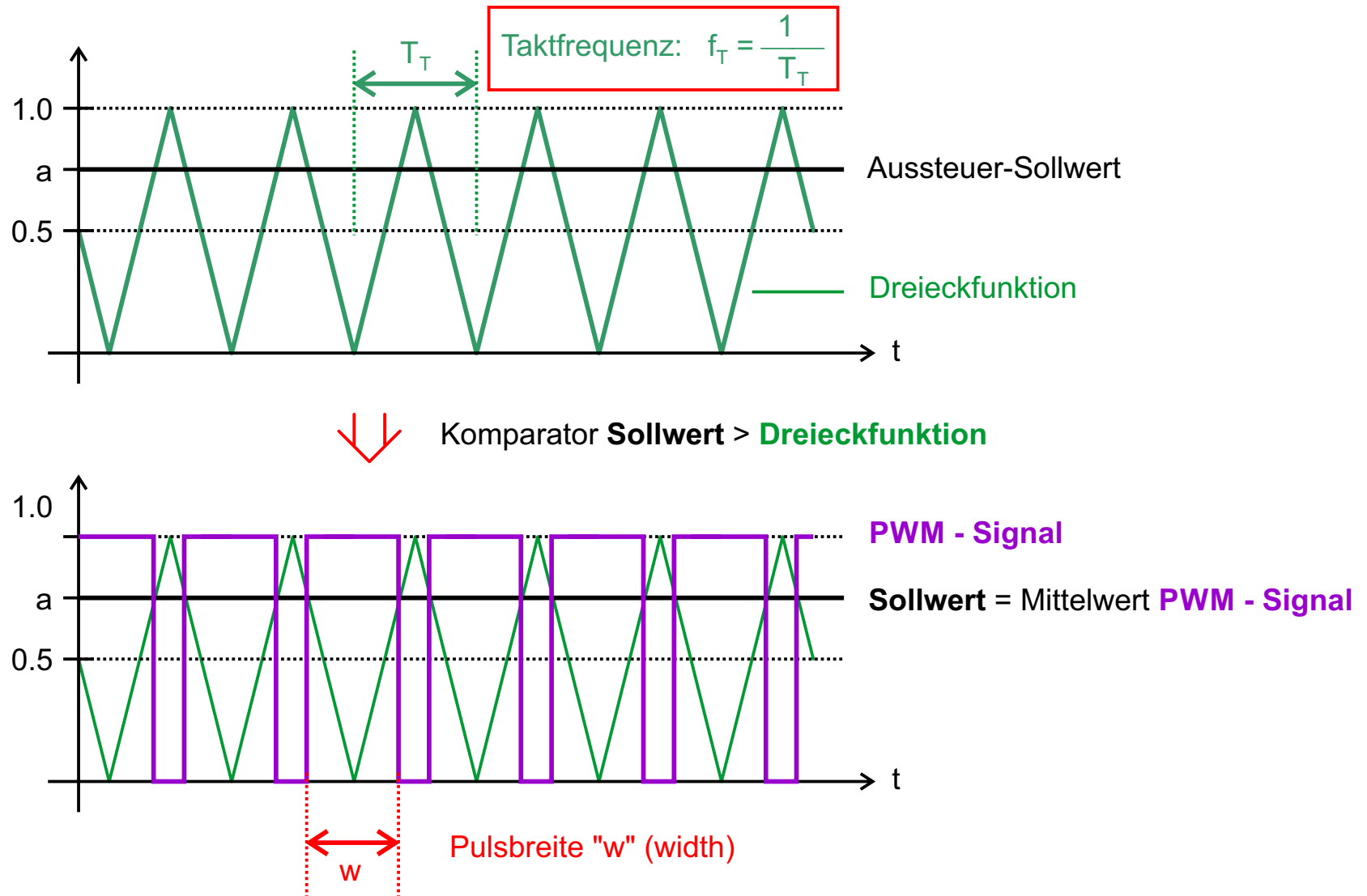
6.4 Drehstrombrücke

6.5 Synchrone und asynchrone Pulsmuster

6.6 Raumzeigermodulation

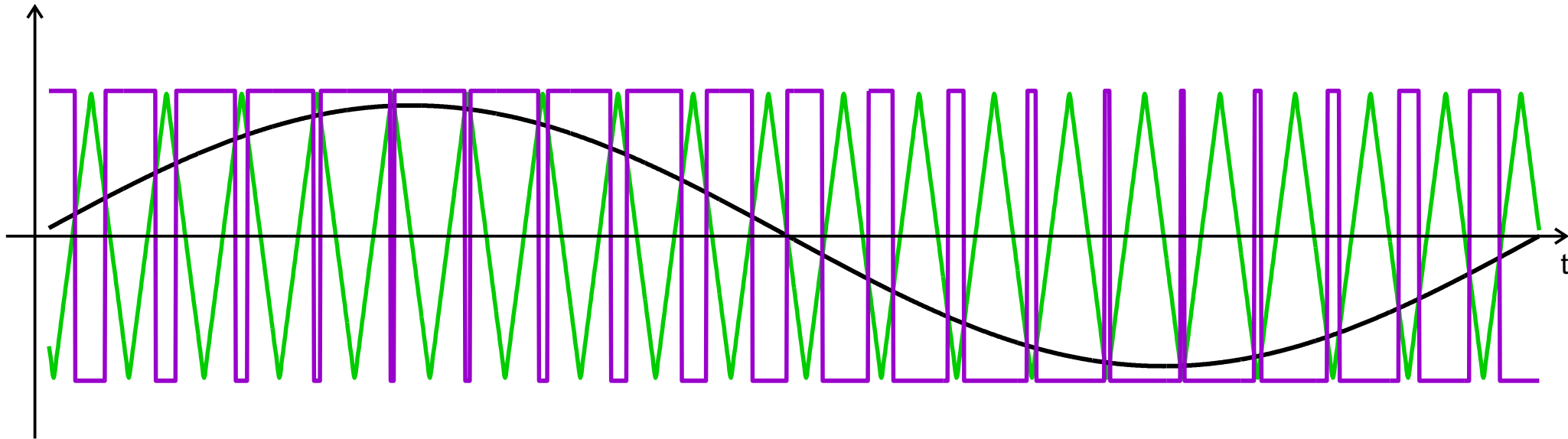
## 6.1 Sinus-Dreieck-Modulation

### Grundidee der Pulse width modulation (PWM)



## 6.1 Sinus-Dreieck-Modulation

### Sinusmodulation "Unterschwingungsverfahren"



**Sollwertfunktion:**  $f_0 = \text{Grundfrequenz}$

**Dreieckfunktion:**  $f_T = \text{Taktfrequenz}$

**PWM-Signal:**  $f_0 + \text{Oberschwingungen}$

**Leistungselektronik** Asynchrones Pulsmuster:  $f_T$  fest,  $f_0$  frei, Obergrenze typ.  $f_{0,\max} \approx \frac{1}{5} f_T$

Synchrones Pulsmuster:  $f_T = n \cdot f_0$  z.b.  $n=3$  "3-Fachtaktung"

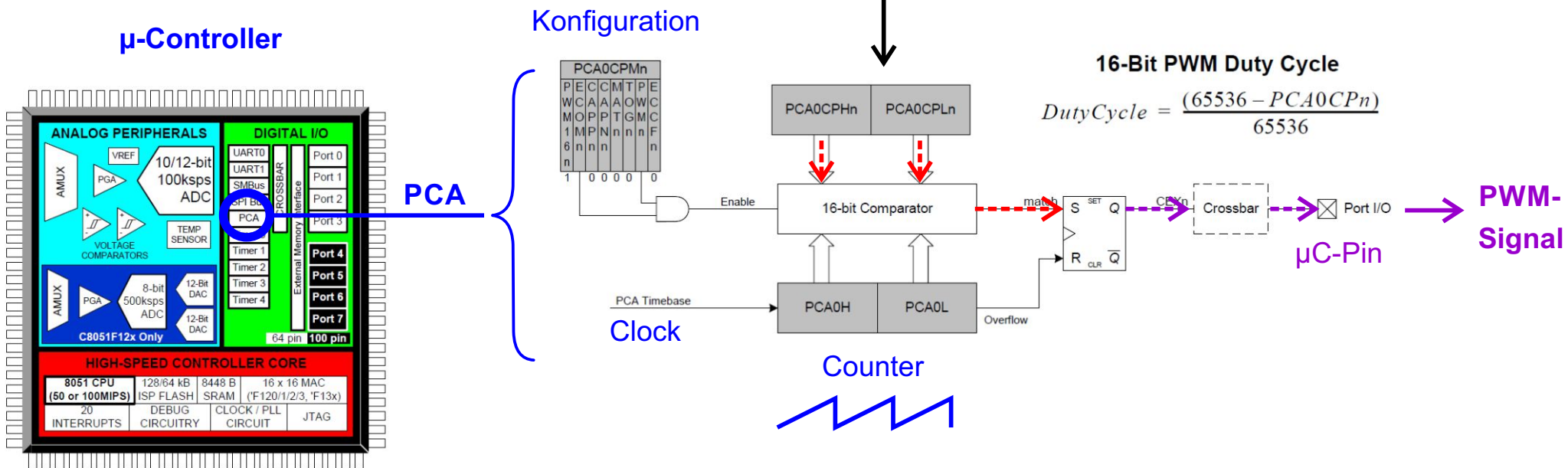
# 6.1 Sinus-Dreieck-Modulation

Beispiel zur Umsetzung in einem µC

Code:

Reglerinterrupt → Sinustabelle auslesen → Pulsbreite

Register beschreiben



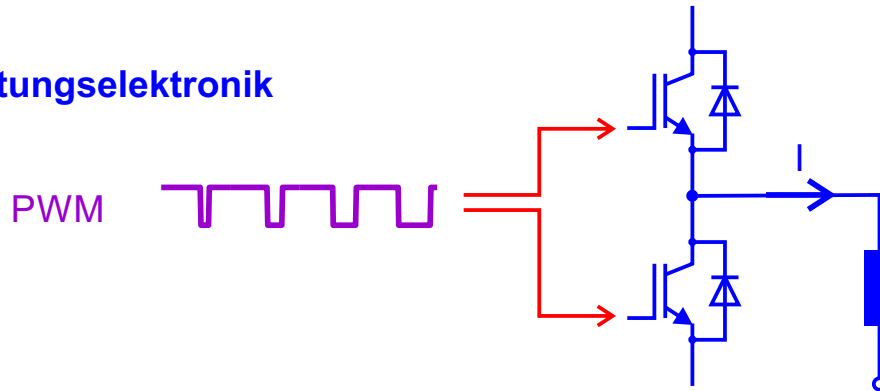
PCA: programmable counter array, als PWM-Generator konfigurierbar

Quelle: Datenblatt Silabs C8051F120

# 6.1 Sinus-Dreieck-Modulation

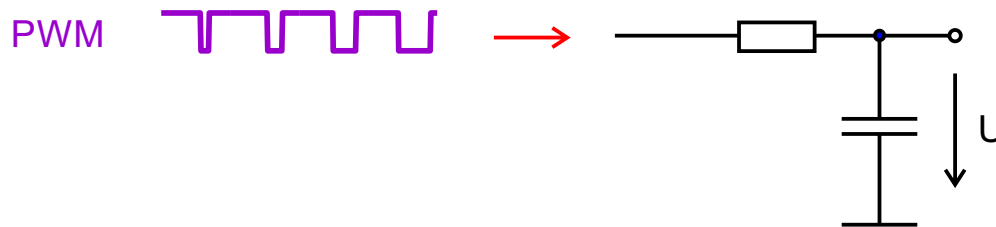
## Demodulation

### Leistungselektronik



Glättungsdrossel oder Maschineninduktivität  
el. Maschine: **Stromeinprägung**  
→ Spannung gepulst, Strom geglättet

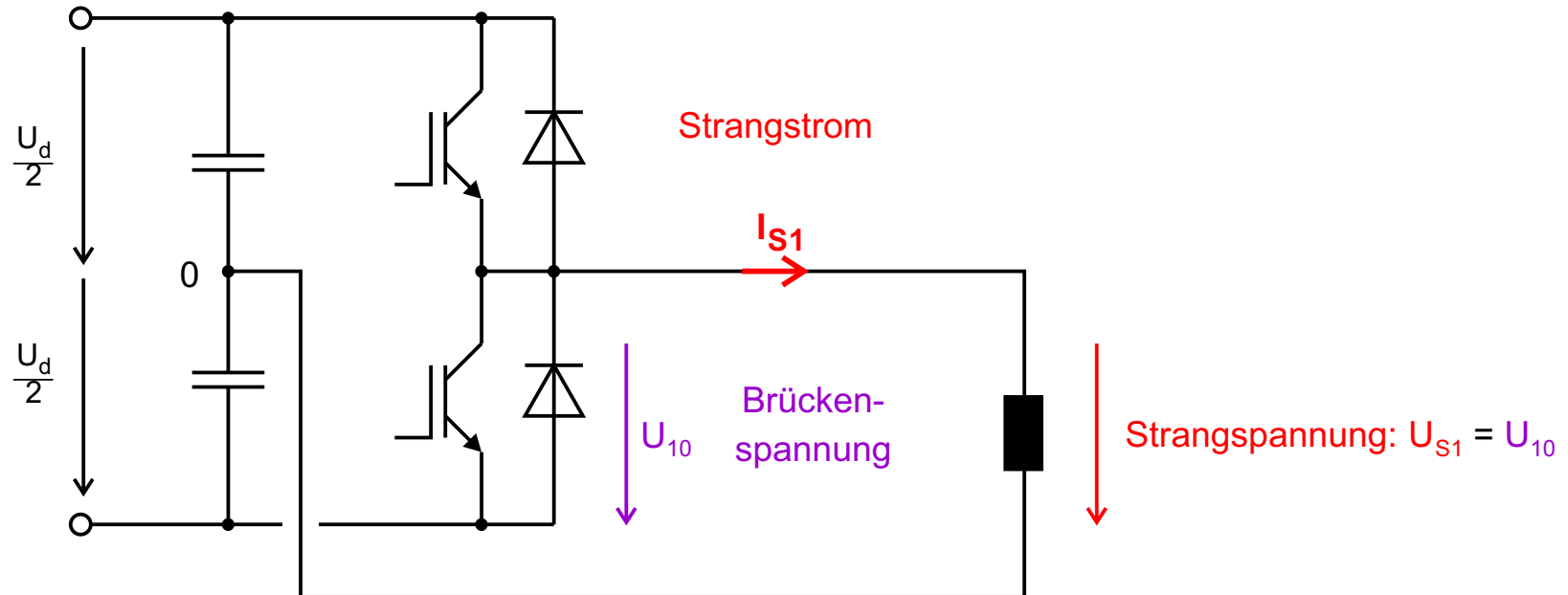
### Signalverarbeitung



analog: Tiefpassglättung, z.B. als 1Bit-DAC  
(digital: Pulsbreitenzähler)

## 6.2 Halbbrücke

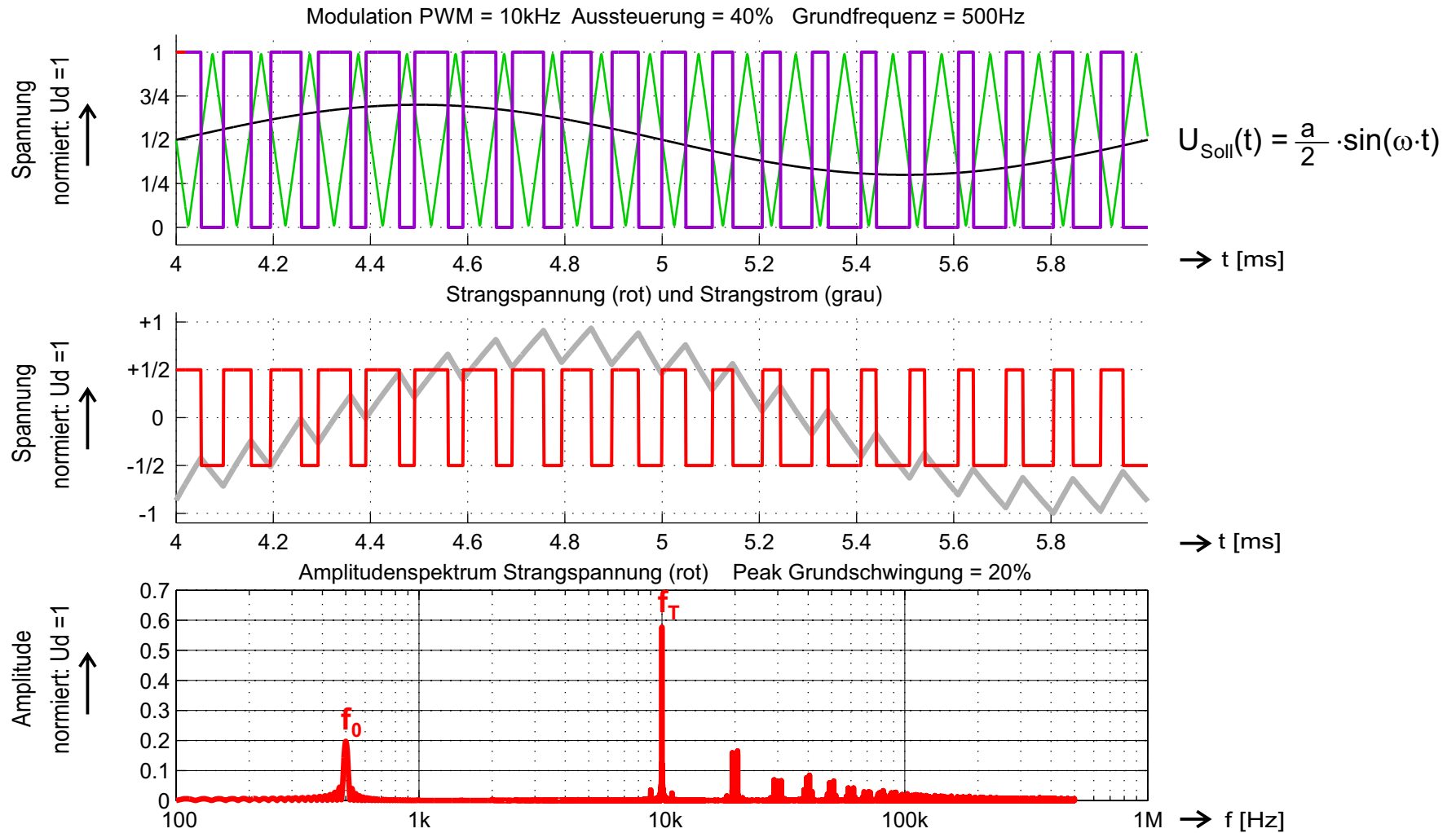
### Halbbrücke als Wechselrichter





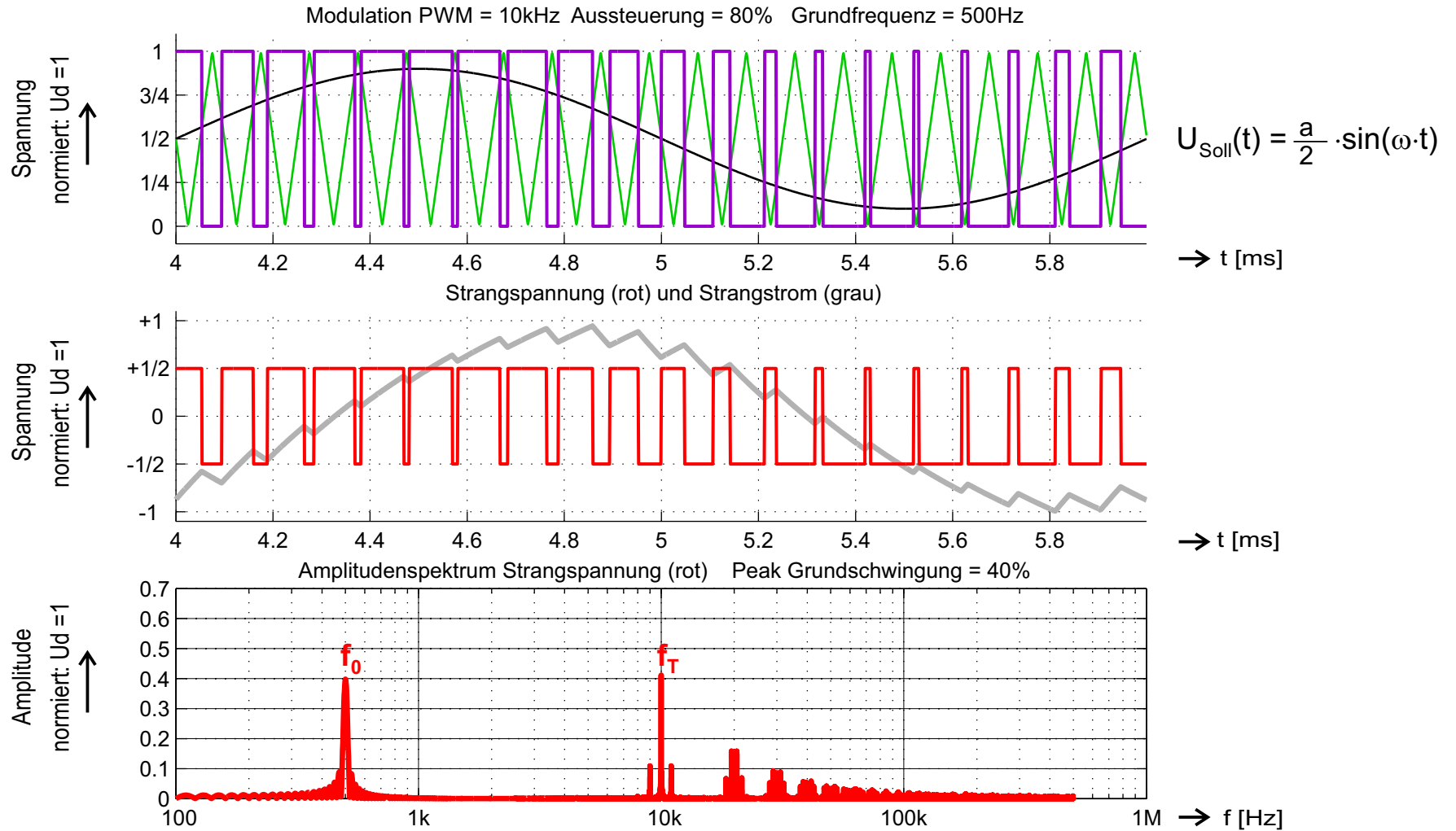
## 6.2 Halbbrücke

### Betrieb im linearen Aussteuerbereich



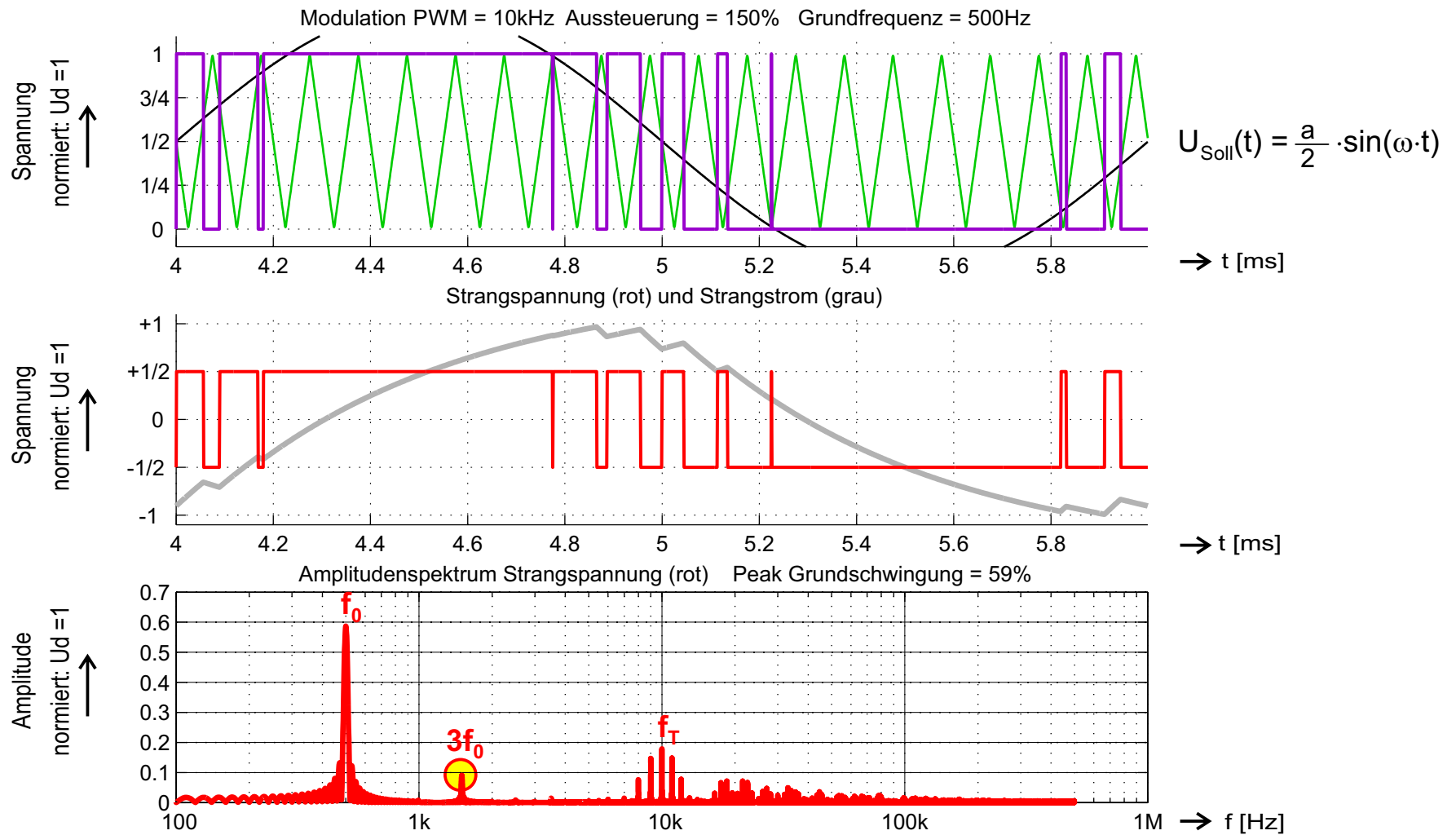
## 6.2 Halbbrücke

### Betrieb im linearen Aussteuerbereich



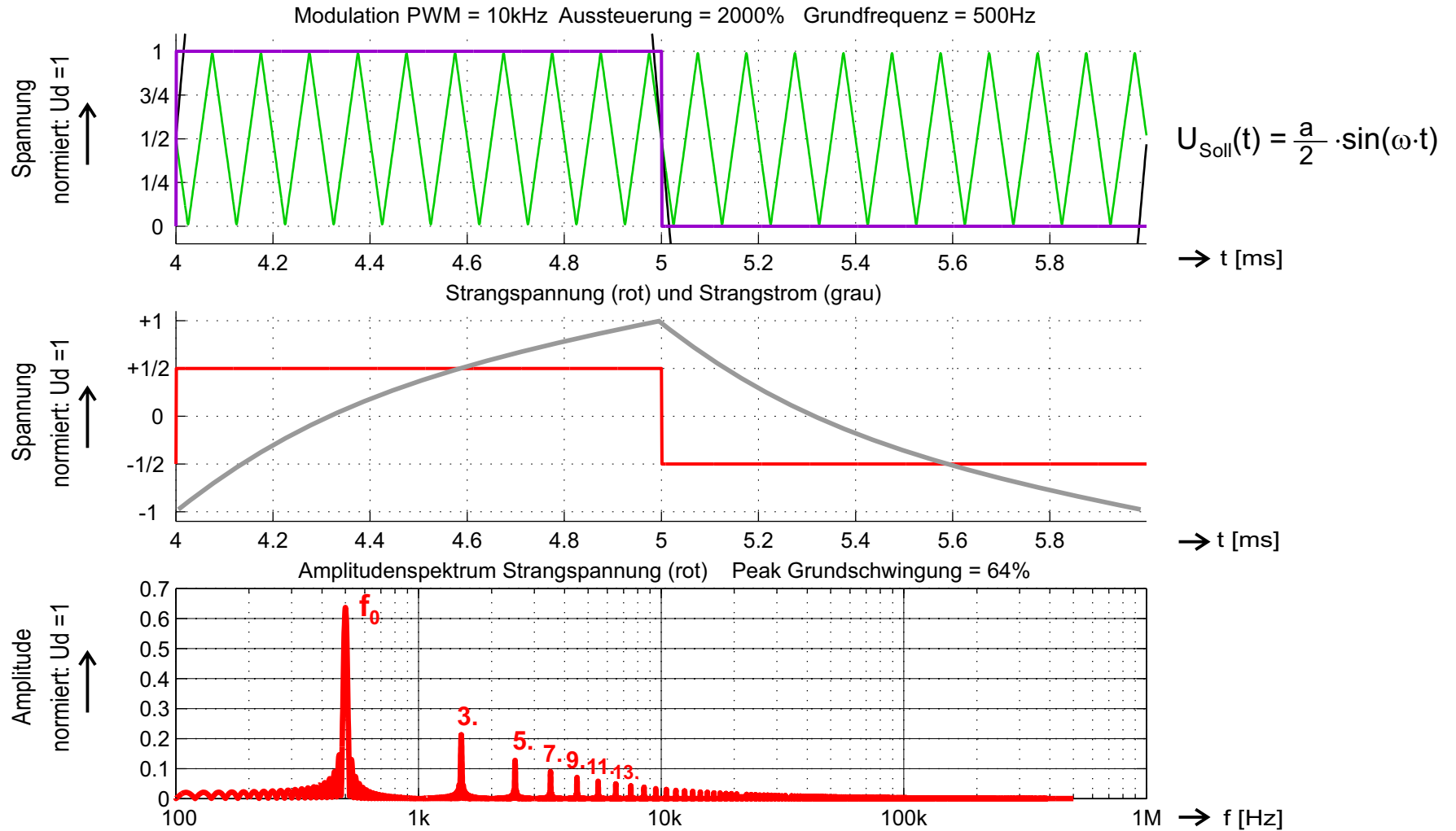
## 6.2 Halbbrücke

### Betrieb mit Übermodulation (PWM nichtlinear)



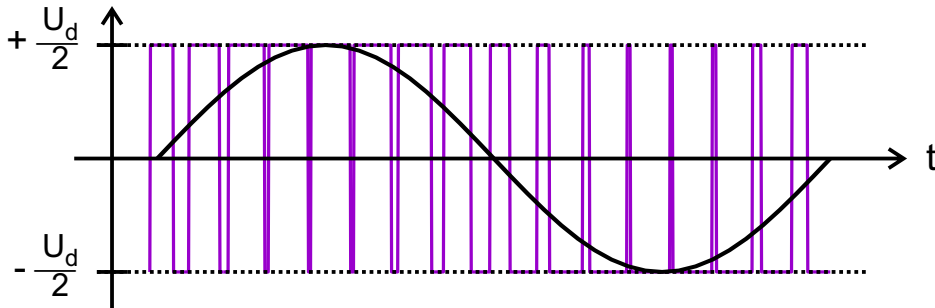
## 6.2 Halbbrücke

### Grundfrequenztaktung = Durchschaltbetrieb = Blocktakt



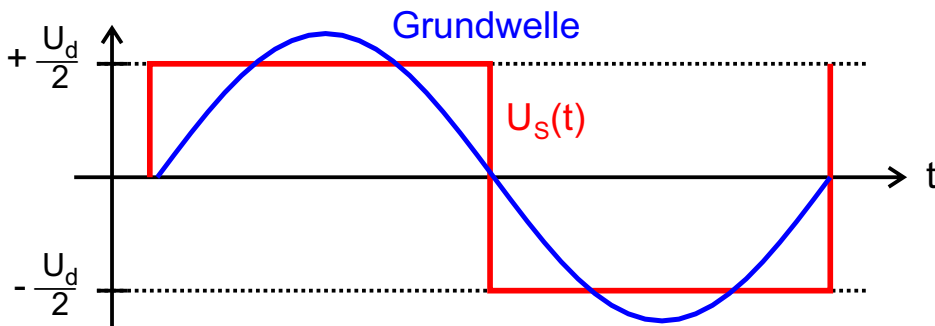
## 6.2 Halbbrücke

### Analyse Aussteuerbereich



#### Linearer Aussteuerbereich

- Amplitude Grundschiwingung = 0..50%  $U_d$
- Strom sinusförmig mit Taktripple
- große Takfrequenz  $\rightarrow$  kleiner Stromrippe



#### Übermodulation

- Amplitude Grundschiwingung = 50..64%  $U_d$
- Strom prinzipiell nicht sinusförmig
- Fourierreihe Rechteckfunktion Strangspannung:

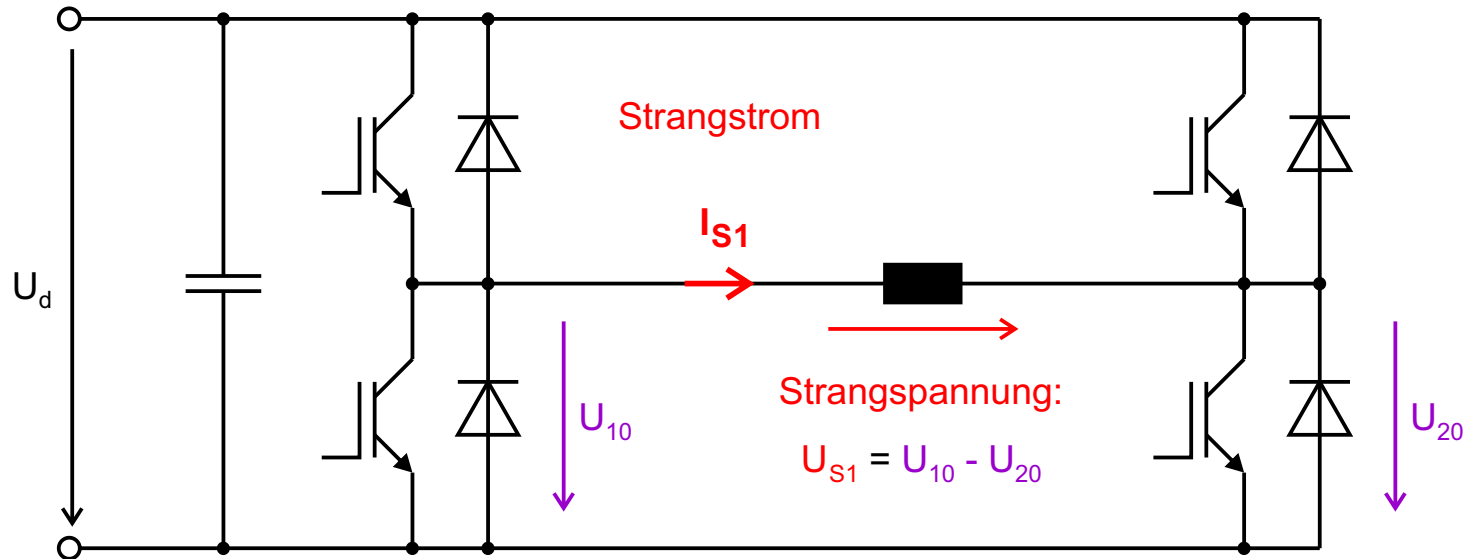
$$U_s(t) = \frac{2 \cdot U_d}{\pi} \cdot \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3 \cdot \omega t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5 \cdot \omega t) + \dots \right)$$

Amplitude Grundwelle:  $\frac{2}{\pi} = 0.6366 \approx 64\%$  von  $U_d$

$\Rightarrow$  Umrichterleistung

## 6.3 Vollbrücke

### Vollbrücke (H-Brücke) als Wechselrichter



Phase 1:

$$U_{\text{Soll}1}(t) = \frac{a}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$



PWM für Phase 1

Phase 2:

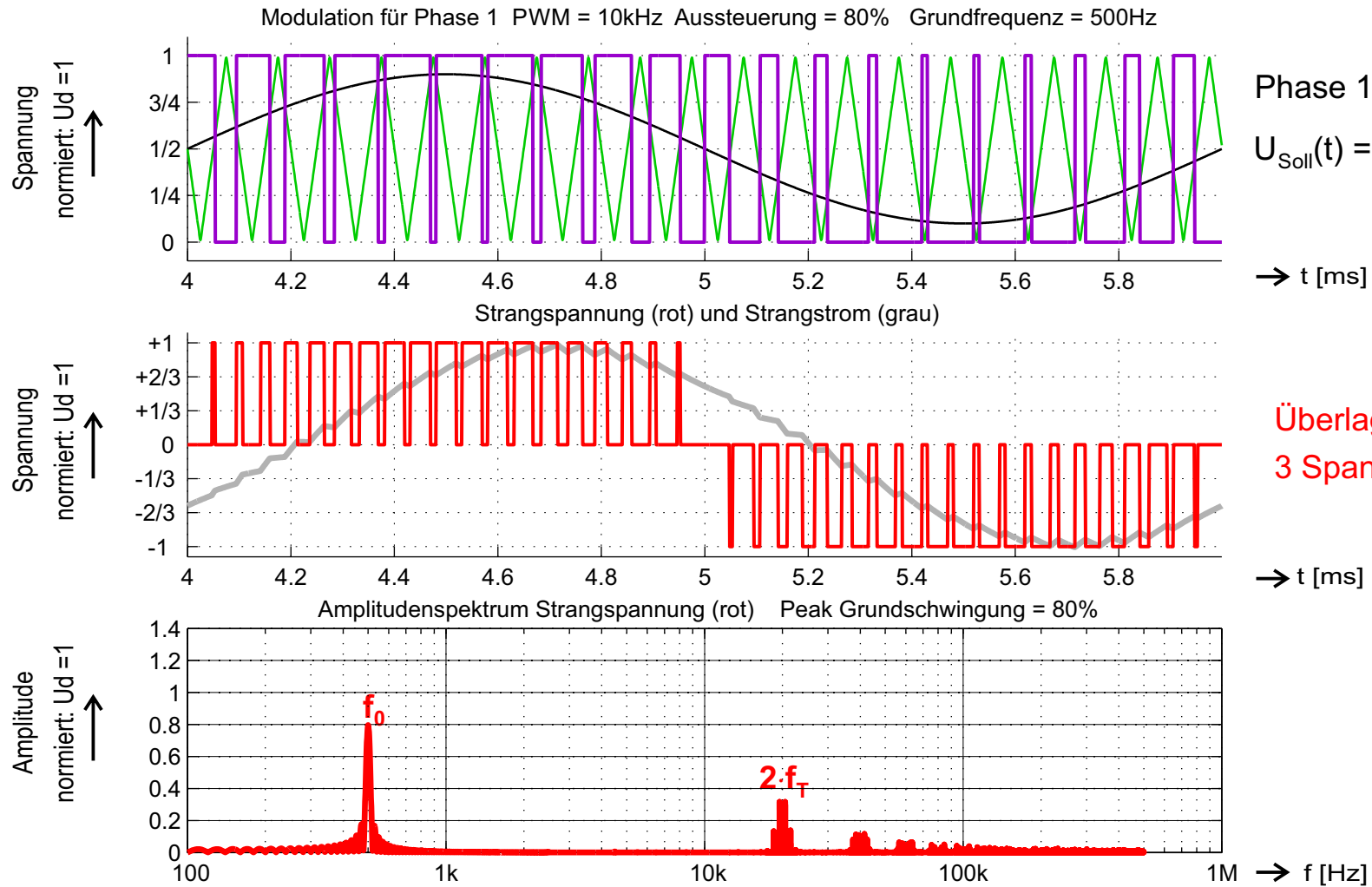
$$U_{\text{Soll}2}(t) = \frac{a}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \pi)$$



PWM für Phase 2

## 6.3 Vollbrücke

### Betrieb im linearen Aussteuerbereich



## 6.3 Vollbrücke

### Analyse Aussteuerbereich

#### Linearer Aussteuerbereich

- Amplitude Grundschiwingung = 0..100%  $U_d$
- Strom sinusförmig mit Taktripple

#### Übermodulation

- Amplitude Grundschiwingung = 100..127%  $U_d$
- Strom nicht sinusförmig, vgl. Halbbrücke

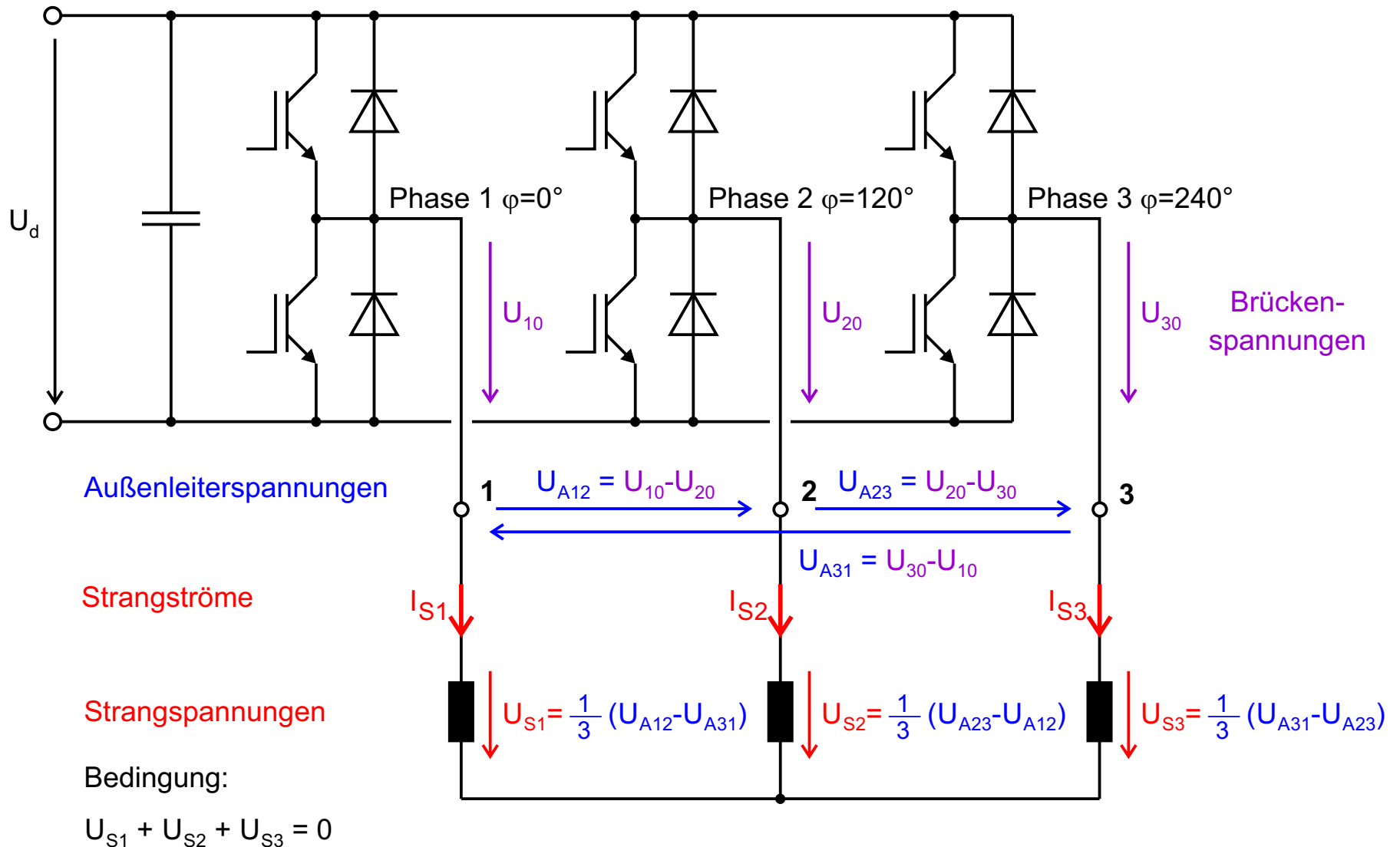
#### Vergleich zur Halbbrücke

- Doppelter Aussteuerbereich
- Überlagerung: 3 Spannungsniveaus
- deutlich kleinerer Stromripple
- doppelte Taktfrequenz der Strangspannung



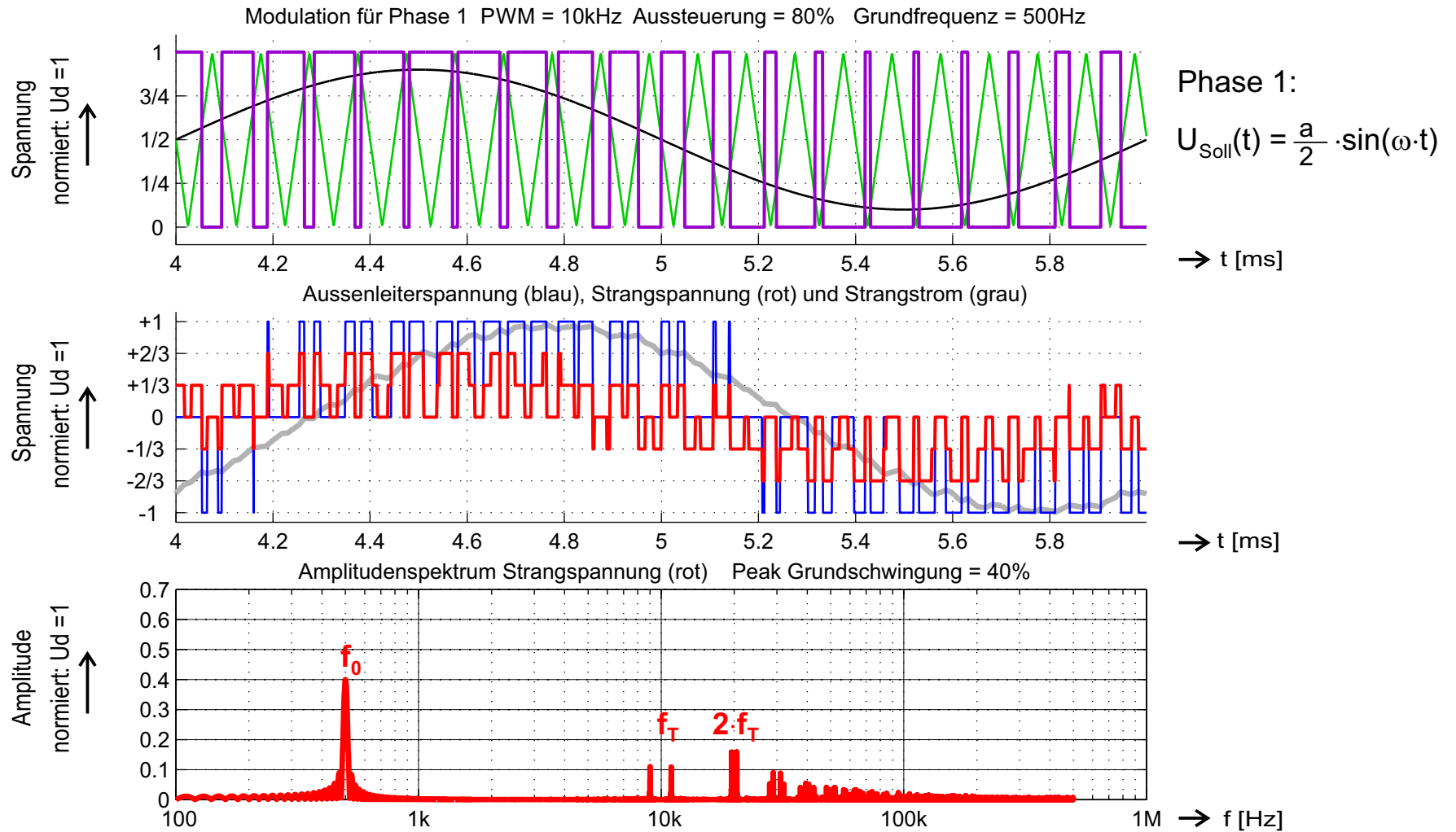
## 6.4 Drehstrombrücke

### 3 Halbrücken als Drehstromwechselrichter



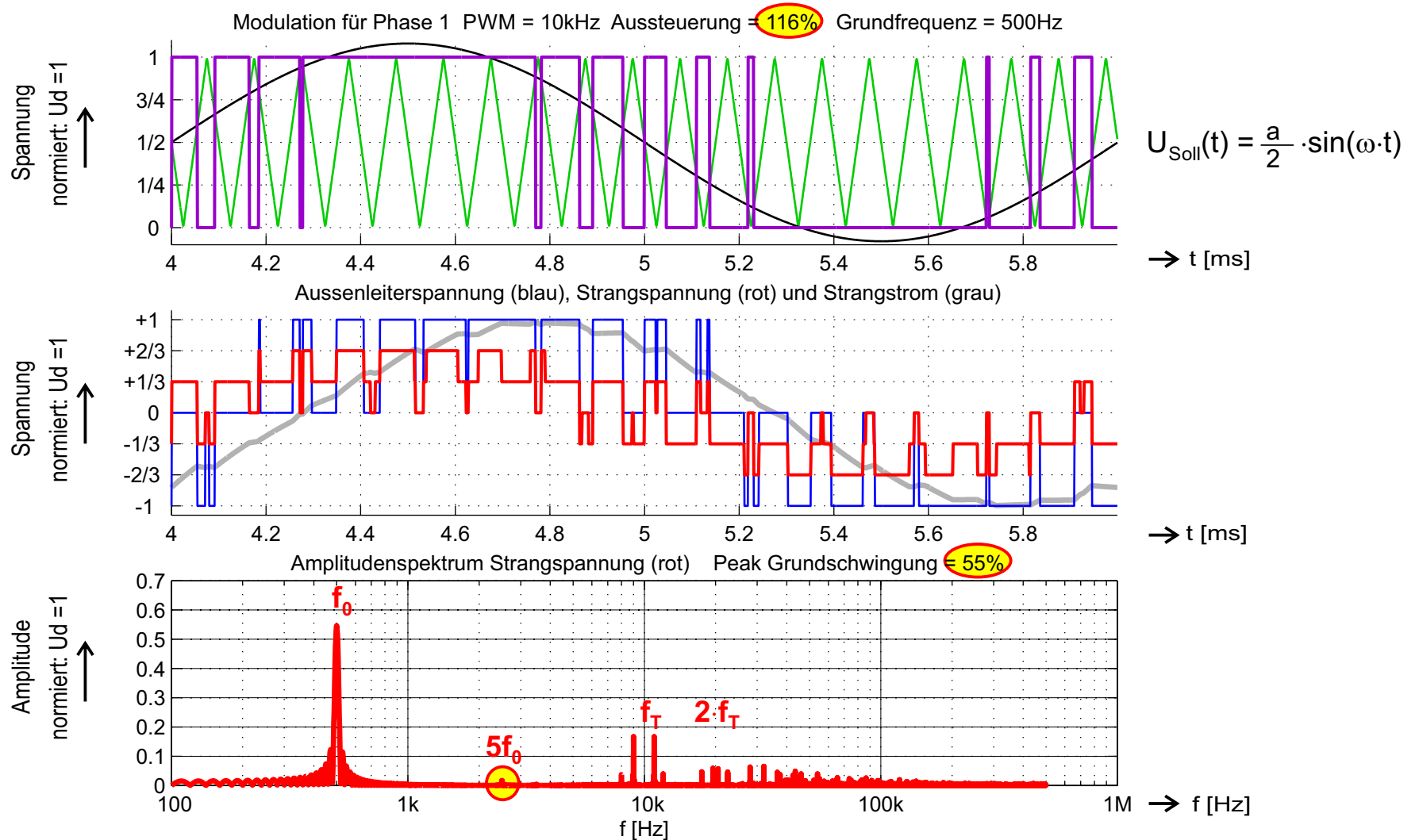
# 6.4 Drehstrombrücke

## Betrieb im linearen Aussteuerbereich



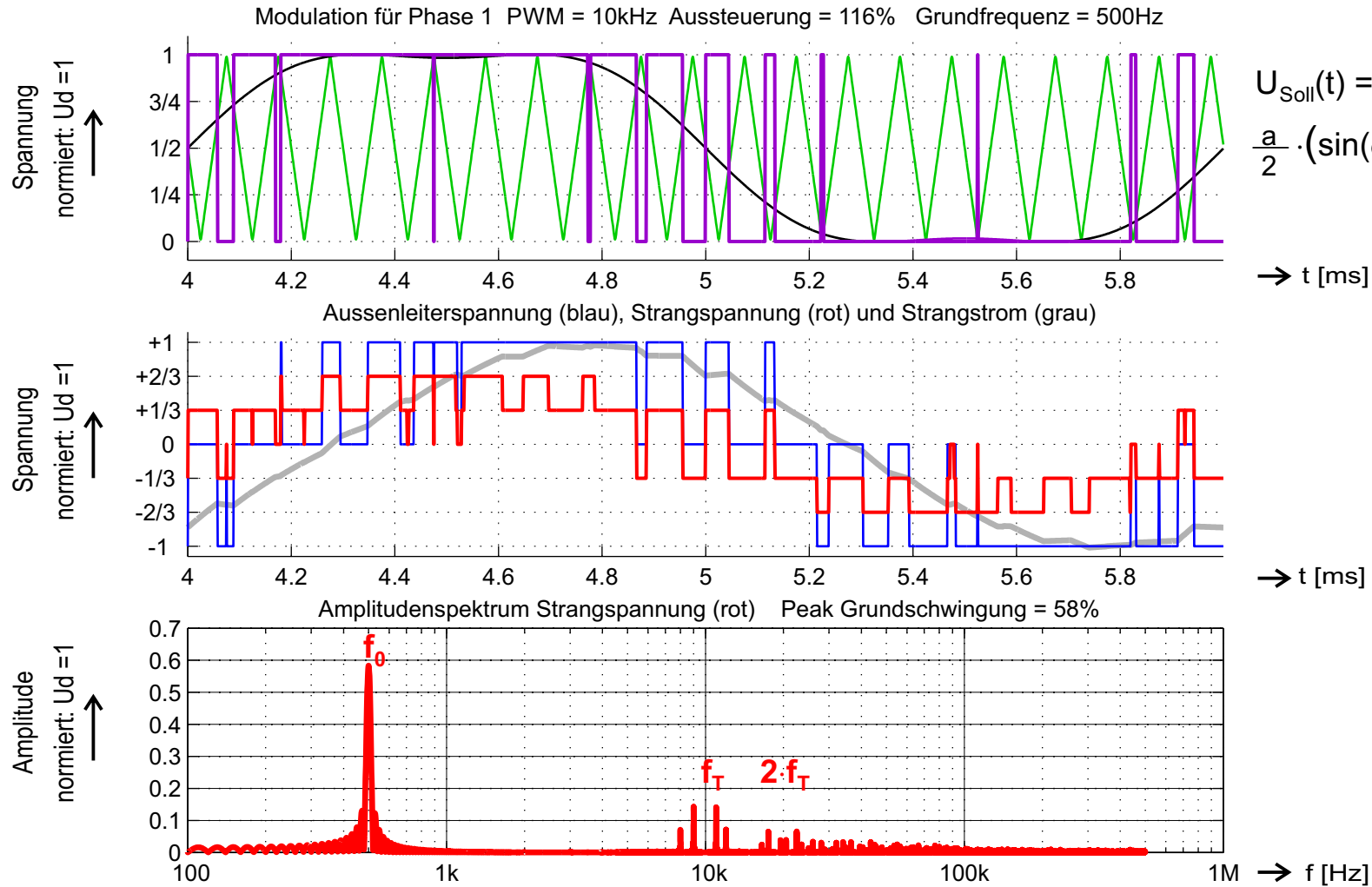
# 6.4 Drehstrombrücke

## Betrieb mit Übermodulation - nichtlinear



# 6.4 Drehstrombrücke

## Erweiterung des linearen Aussteuerbereiches



$$U_{\text{Soll}}(t) = \frac{a}{2} \cdot \left( \sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{6} \cdot \sin(3\omega \cdot t) \right)$$

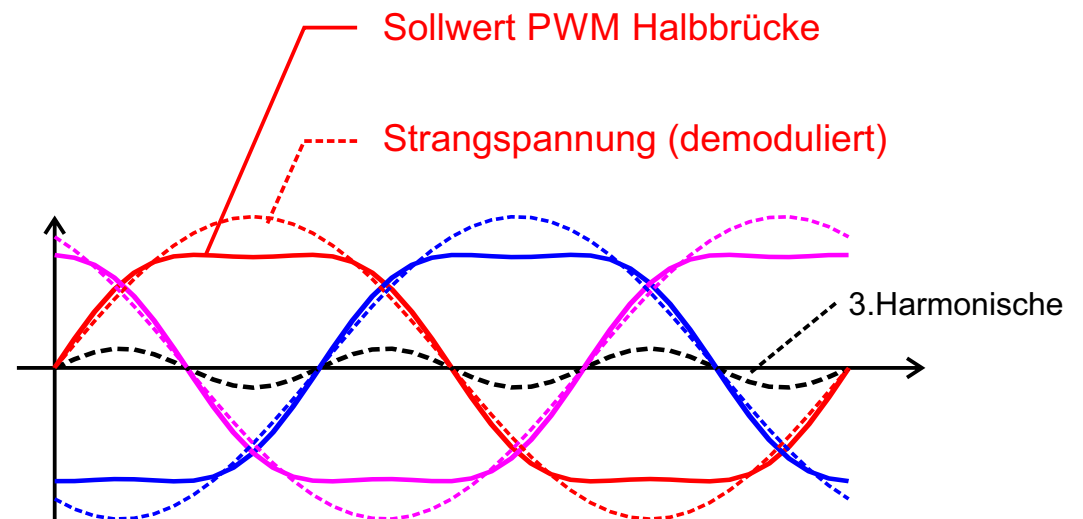
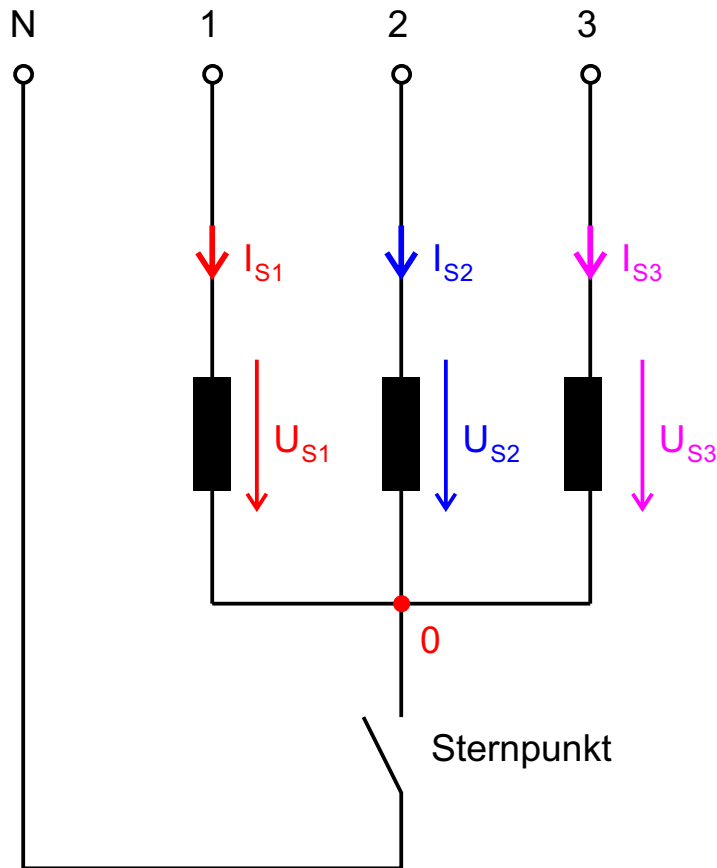
→ t [ms]      ↑  
3. harmonische

## 6.4 Drehstrombrücke

### Erweiterung des linearen Aussteuerbereiches

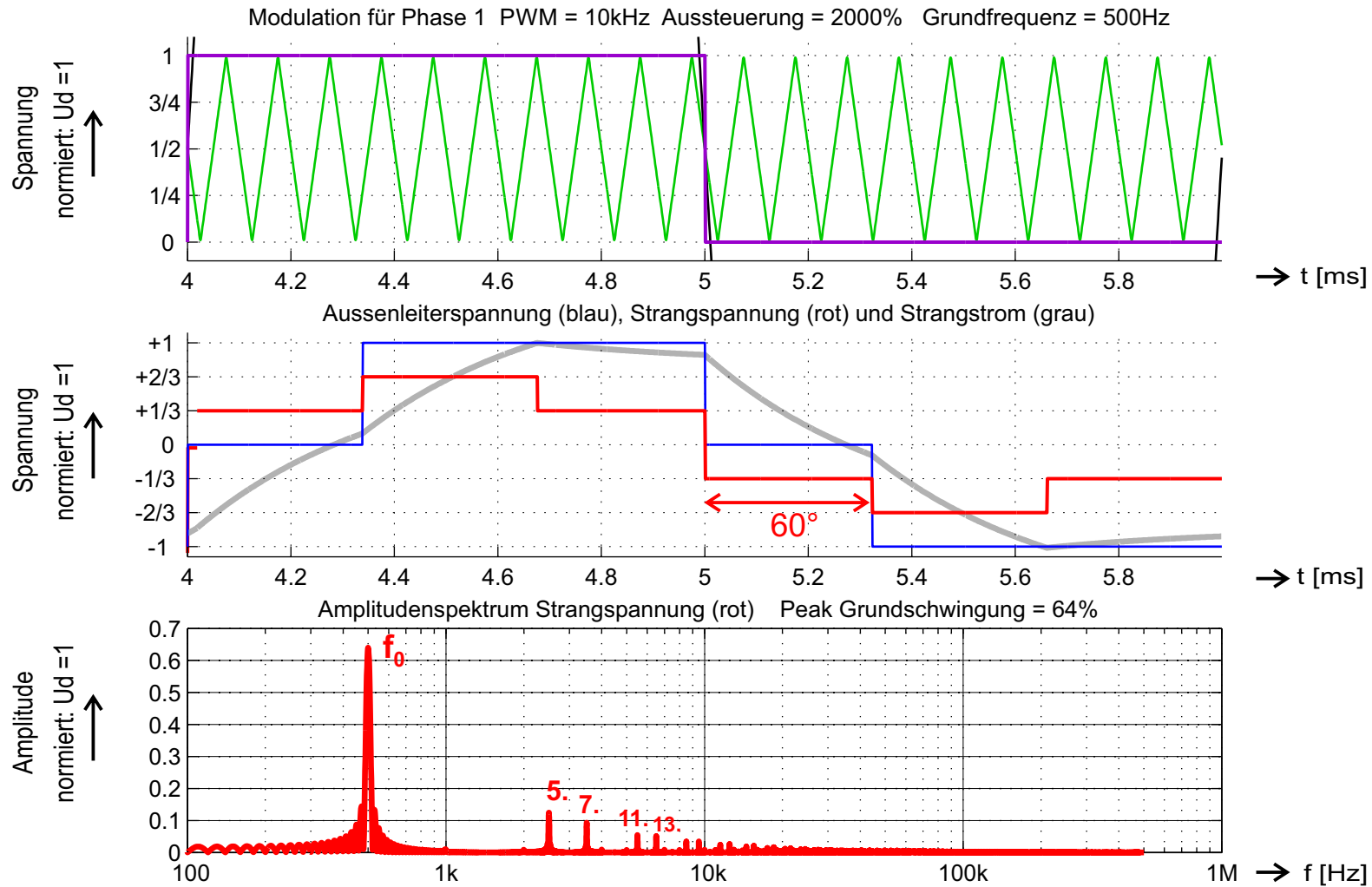
#### Nullsystem

- Nullsystem: Gleichanteil und Vielfache der 3. Harmonischen können sich bei **offenem** Stern **nicht** in  $U_S$  und  $I_S$  ausbilden
- in diesem Fall: Summe  $U_{S1} + U_{S2} + U_{S3} = 0$



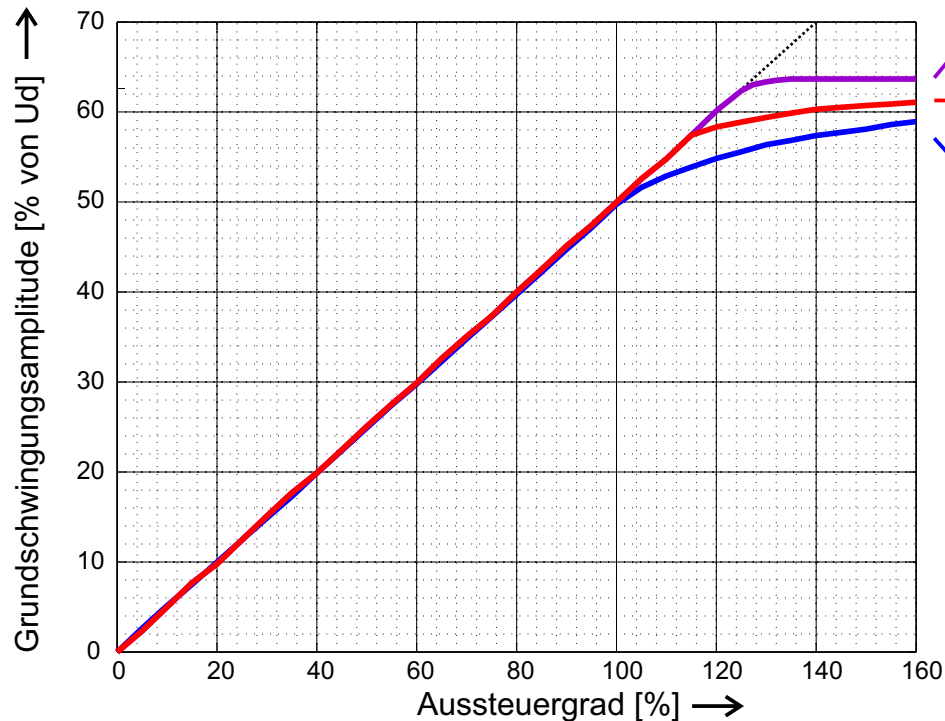
## 6.4 Drehstrombrücke

### Grundfrequenztaktung / Blocktakt



## 6.4 Drehstrombrücke

### Analyse Aussteuerbereich



#### Aussteuerbereiche

#### Grundschiwungsamplituden:

Linearisierung Aussteuerung bis Blocktakt:

PWM nichtlinear bis  $\frac{2}{\pi} \cdot U_d \approx 64\% U_d$

Sinus mit 3. harmonischer:

PWM linear bis  $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_d \approx 58\% U_d$

reine Sinusmodulation:

PWM linear bis  $\frac{1}{2} \cdot U_d = 50\% U_d$

#### Scheinleistung

#### Drehstromwechselrichter:

$$S = 3 \cdot U_{S,\text{eff}} \cdot I_{S,\text{eff}} = \frac{3}{2} \hat{U}_S \cdot \hat{I}_S$$

(Grundschiwungsamplituden)

→ Kapitel 7 Dimensionierung

## 6.4 Drehstrombrücke

### Wechselrichterausgangsspannung und Scheinleistung

#### Wechselrichterausgangsspannung:

Grundschwingungsamplitude Strangspannung bei Sternschaltung = Raumzeigerlänge  $\hat{U}_{1S}$

$$\hat{U}_{1S} = a \cdot \frac{U_d}{2}$$

Aussteuergrad  $a$   
(von überlagerter Regelung)

Betrieb mit linearer PWM:  $a = 0 \dots 1.16$  (mit 3. Harmonischer)

Betrieb mit Blocktakt möglich:  $a = 0 \dots 1.28$  (Übermodulation)

} Stellgrenzen

**Wechselrichterscheinleistung:**  $S = 3 \cdot U_{S,\text{eff}} \cdot I_{S,\text{eff}} = \frac{3}{2} \hat{U}_{1S} \cdot \hat{I}_{1S}$

Modulation mit 3. Harmonischer:

$$\hat{U}_{1S\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_d \approx 0.58 \cdot U_d$$

$$S_{\text{max}} = \frac{3}{2} \cdot \hat{U}_{1S} \cdot \hat{I}_{1S} = 0.87 \cdot U_d \cdot \hat{I}_{1S}$$

Modulation bis Blocktakt:

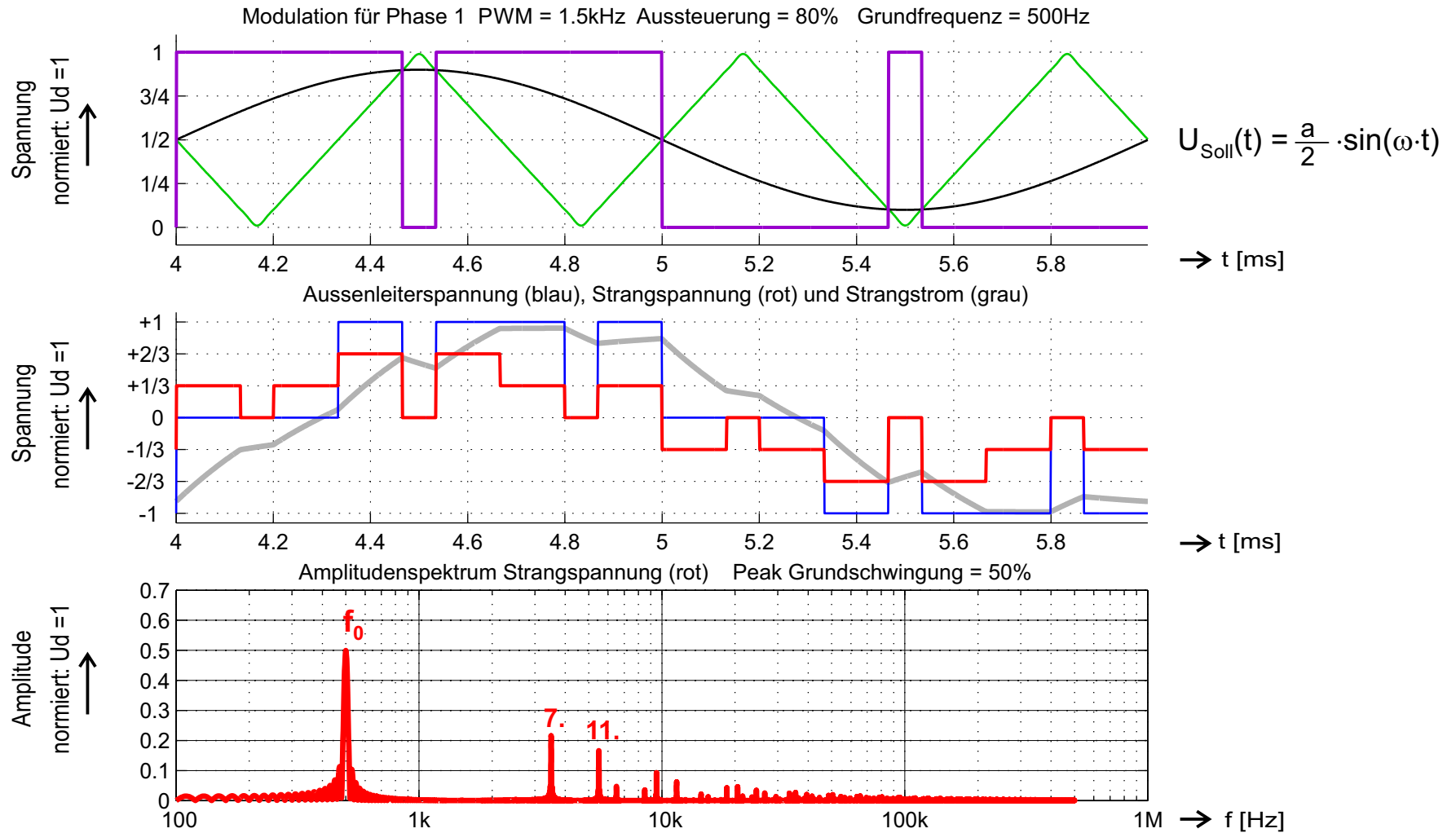
$$\hat{U}_{1S\text{max}} = \frac{2}{\pi} \cdot U_d \approx 0.64 \cdot U_d$$

$$S_{\text{max}} = \frac{3}{2} \cdot \hat{U}_{1S} \cdot \hat{I}_{1S} = 0.96 \cdot U_d \cdot \hat{I}_{1S}$$



## 6.5 Synchrones und asynchrones Pulsmuster

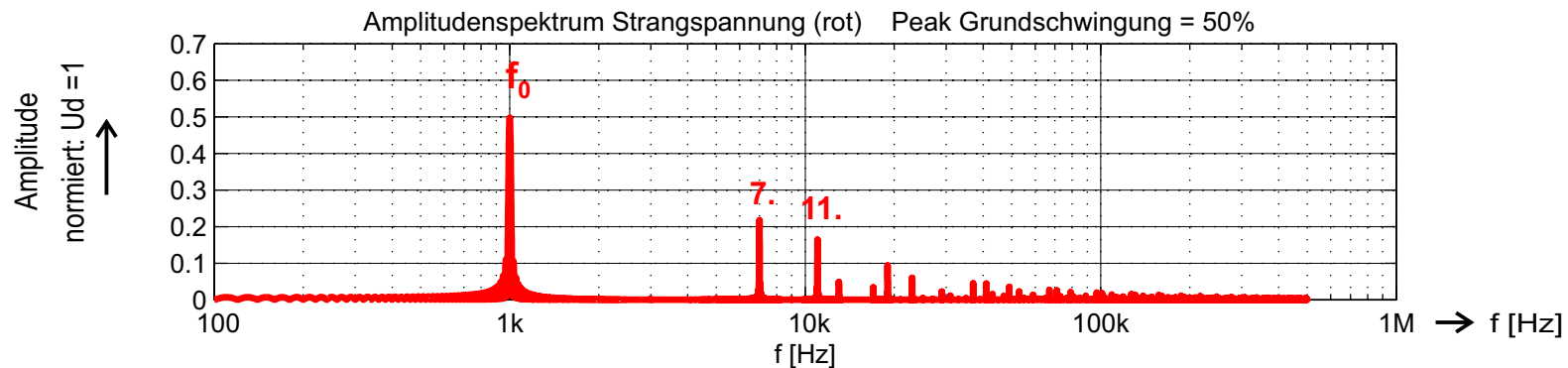
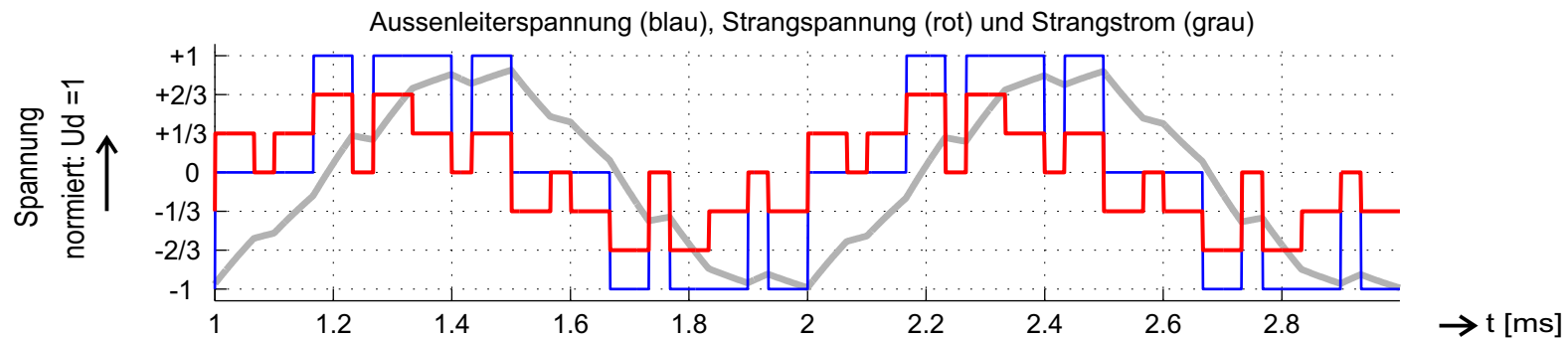
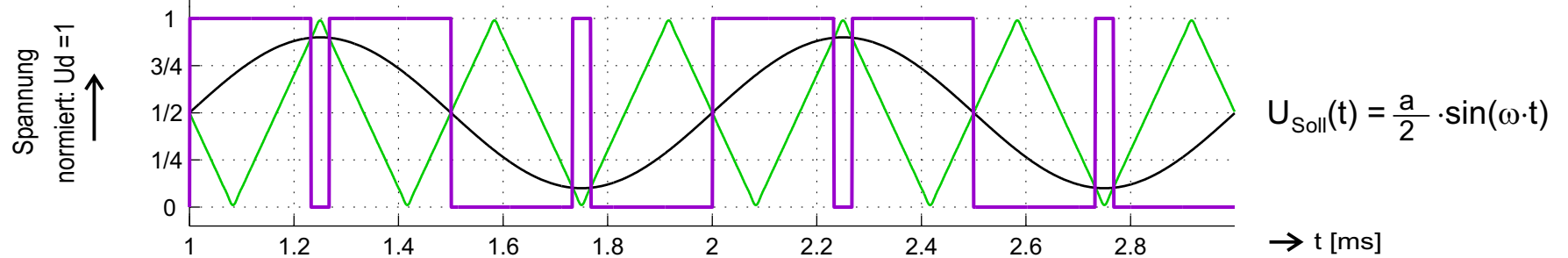
### Synchrones Pulsmuster: 3-Fachtaktung



# 6.5 Synchrone und asynchrone Pulsmuster

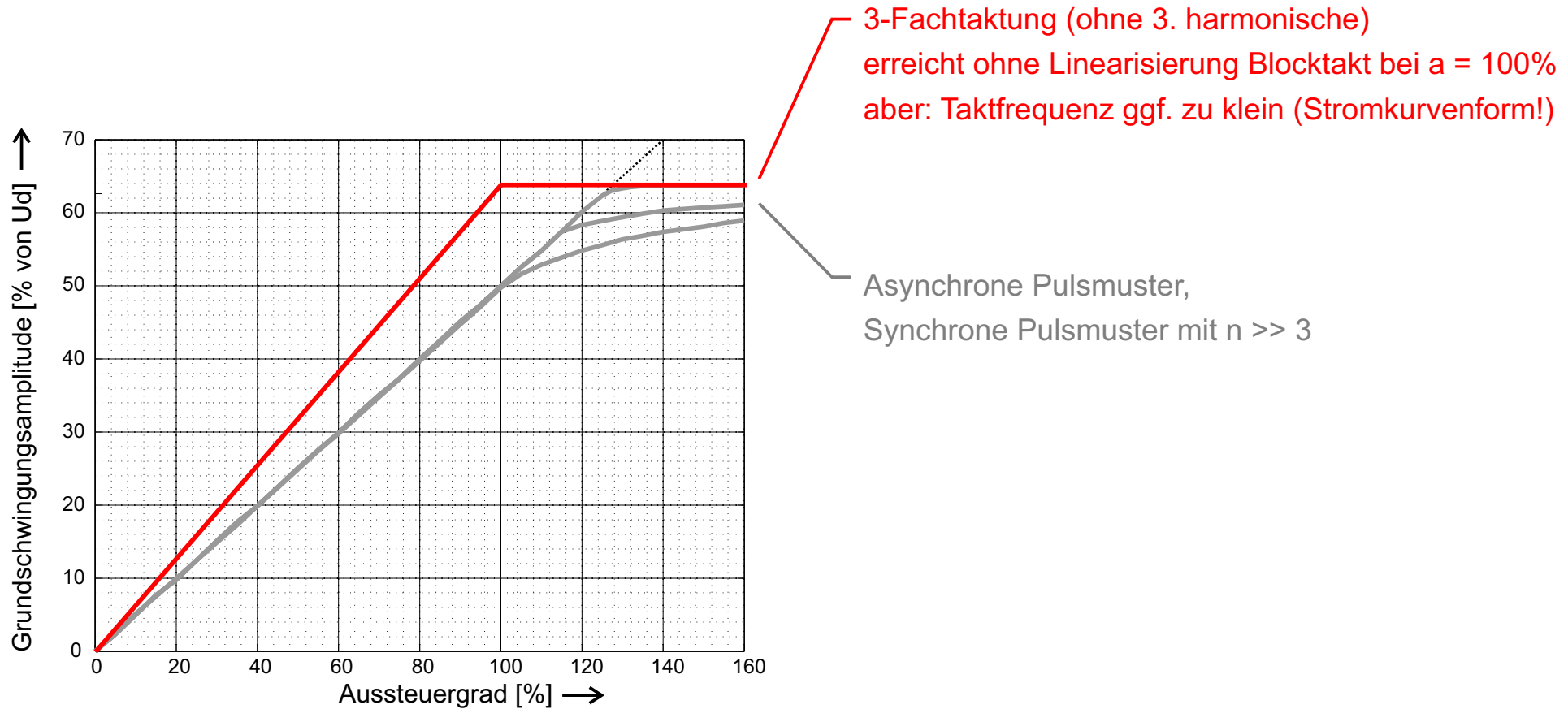
## 3-Fachtaktung, doppelte Grundfrequenz

Modulation für Phase 1 PWM = 3kHz Aussteuerung = 80% Grundfrequenz = 1000Hz



## 6.5 Synchron und asynchrone Pulsmuster

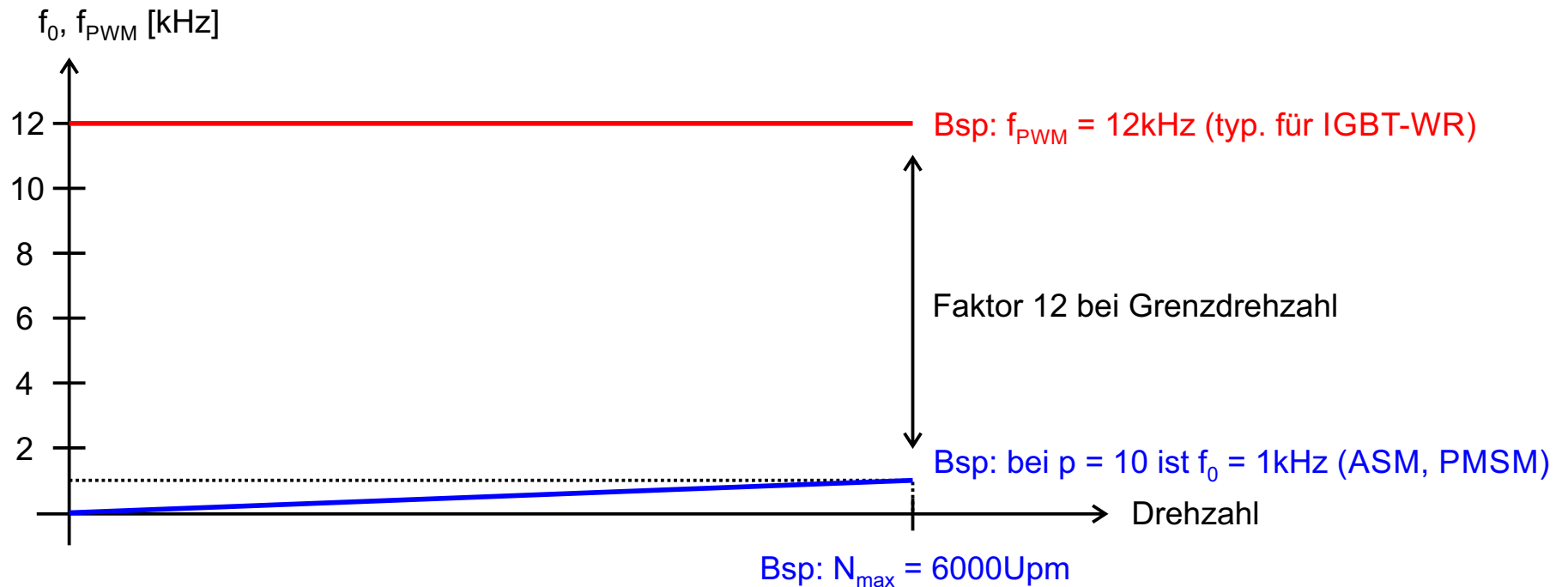
### 3-Fachtaktung, Aussteuerverhalten



## 6.5 Synchrone und asynchrone Pulsmuster

### Einsatz asynchroner Pulsmuster

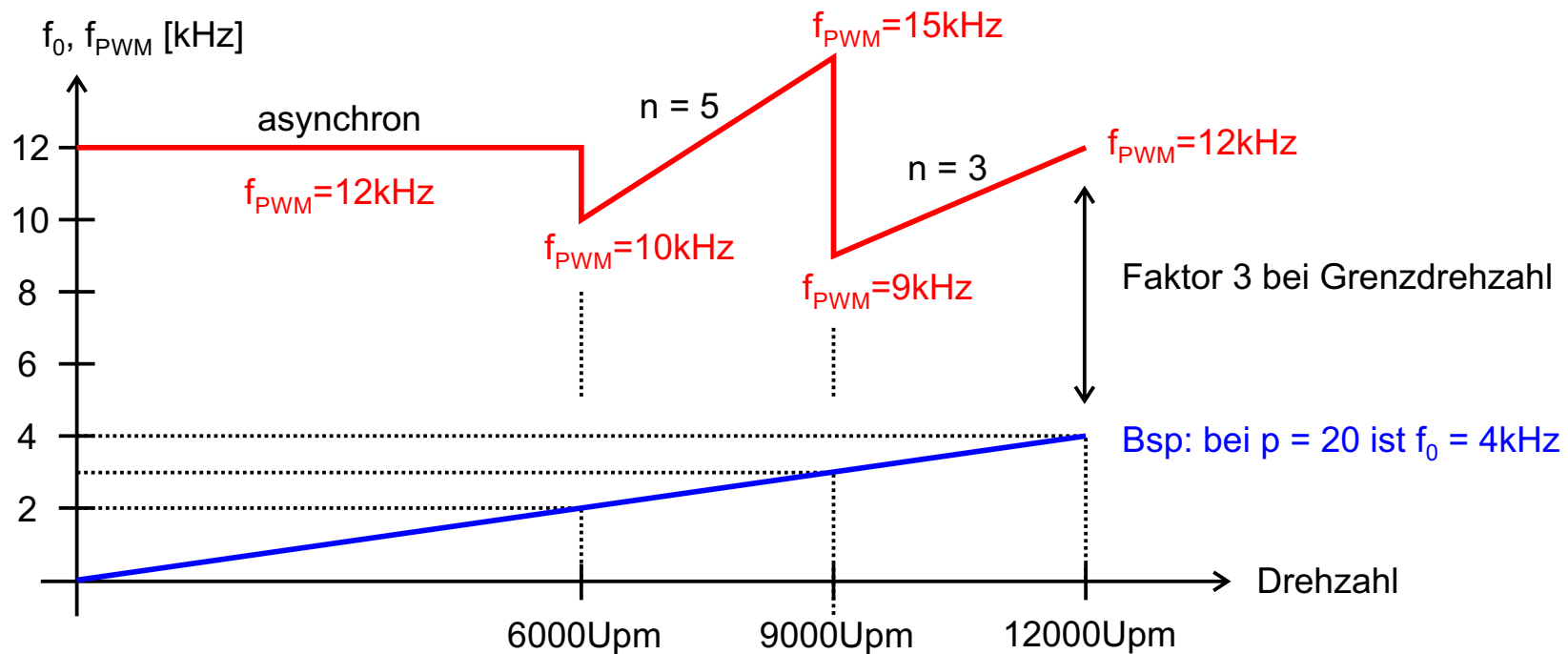
- Taktfrequenz  $f_{PWM} = \text{const}$
- Anwendung: wenn Grundfrequenz  $f_0 \ll f_{PWM}$  (mindestens Faktor 5)
- Bsp. aus Abschnitt 7.5 und 7.6:  $f_0 = 1\text{kHz}$  und  $f_{PWM} = 16\text{kHz}$
- El. Antrieb: Grundfrequenz = Polwechselfrequenz der Maschine



## 6.5 Synchroner und asynchrone Pulsmuster

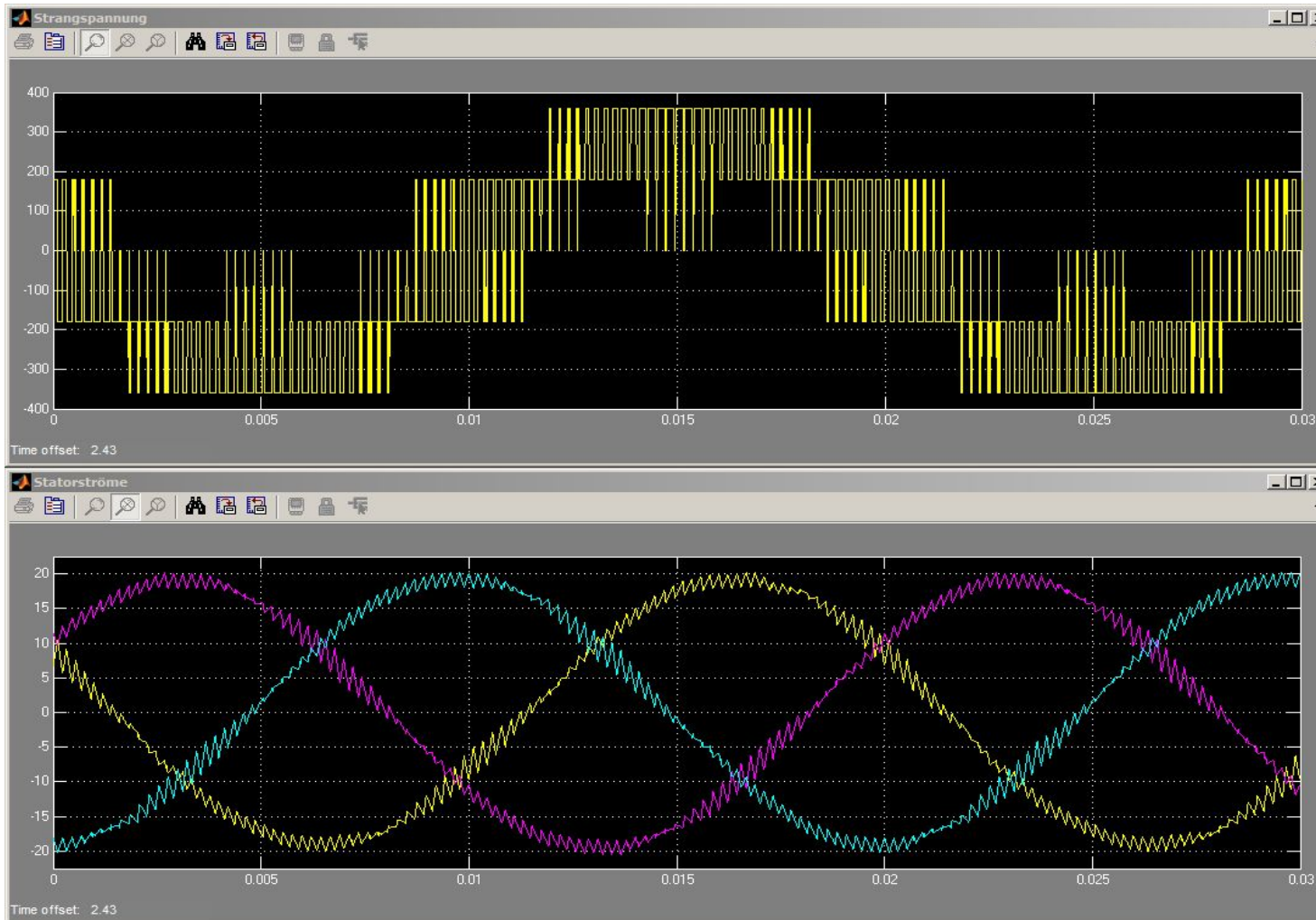
### Einsatz synchroner Pulsmuster

- Taktfrequenz  $f_{\text{PWM}} = n \cdot f_0$
- Anwendung bei sehr hohen Grundfrequenzen  $f_0$
- Umschaltunkte mit unterschiedlichen Taktverhältnissen
- Einsatzgebiete: neuartige Maschinen, Schwungradspeicher



## 6.5 Synchroner und asynchroner Pulsmuster

Beispiel Asynchronmaschine:  $f_0 = 50\text{Hz}$ ,  $f_{\text{PWM}} = 4.5\text{kHz}$   
(Pulsmuster asynchron bzw. synchron mit  $n = 90$ )

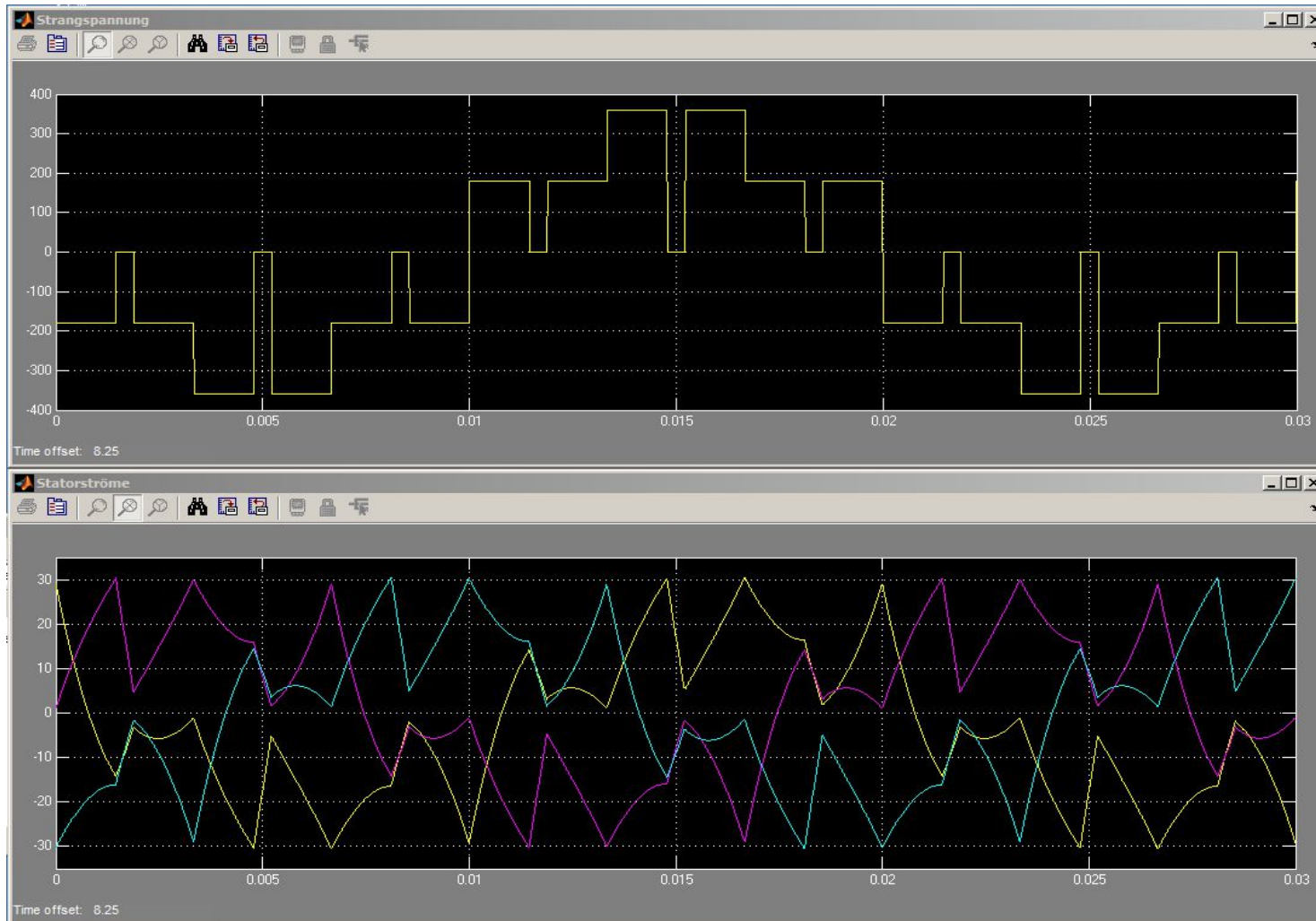


Strangspannung  
Phase U

Strangströme  
gelb: Phase U

## 6.5 Synchroner und asynchroner Pulsmuster

Beispiel Asynchronmaschine:  $f_0 = 50\text{Hz}$ , 3-Fachtaktung



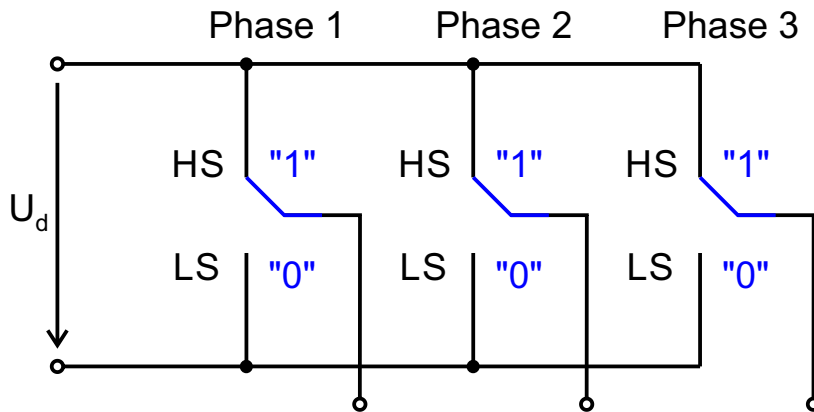
Strangspannung  
Phase U

Strangströme  
gelb: Phase U

## 6.6 Raumzeigermodulation

### Grundidee

Drehstrombrücke, HS/LS-Schalter durch Wechselschalter ersetzt.



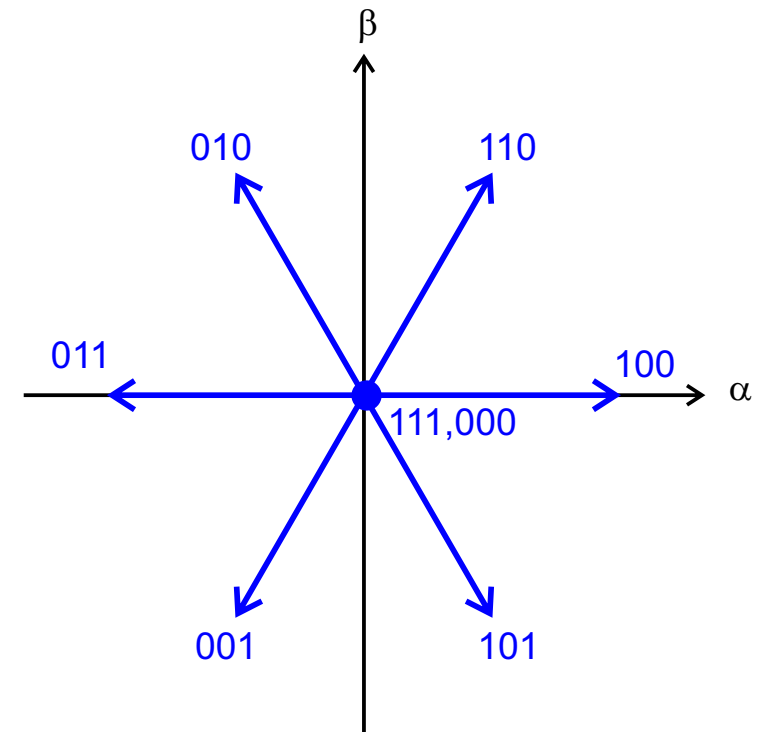
Schaltzustand:

Phase 1 - Phase 2 - Phase 3

z.B. 1 - 0 - 0 = "100"

$2^3 = 8$  Schaltzustände

000 und 111: Nullspannungszeiger



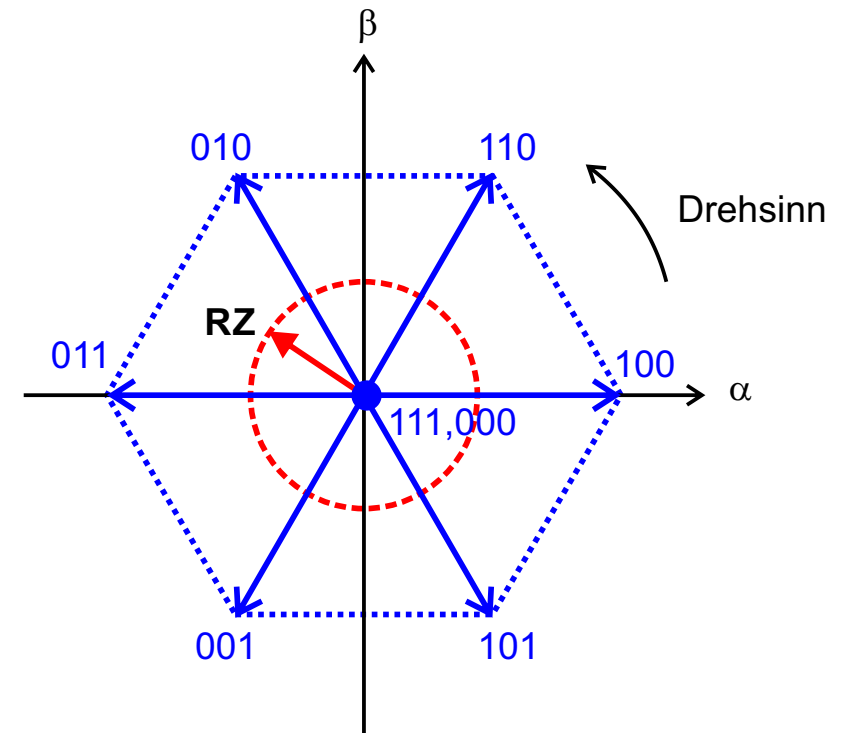
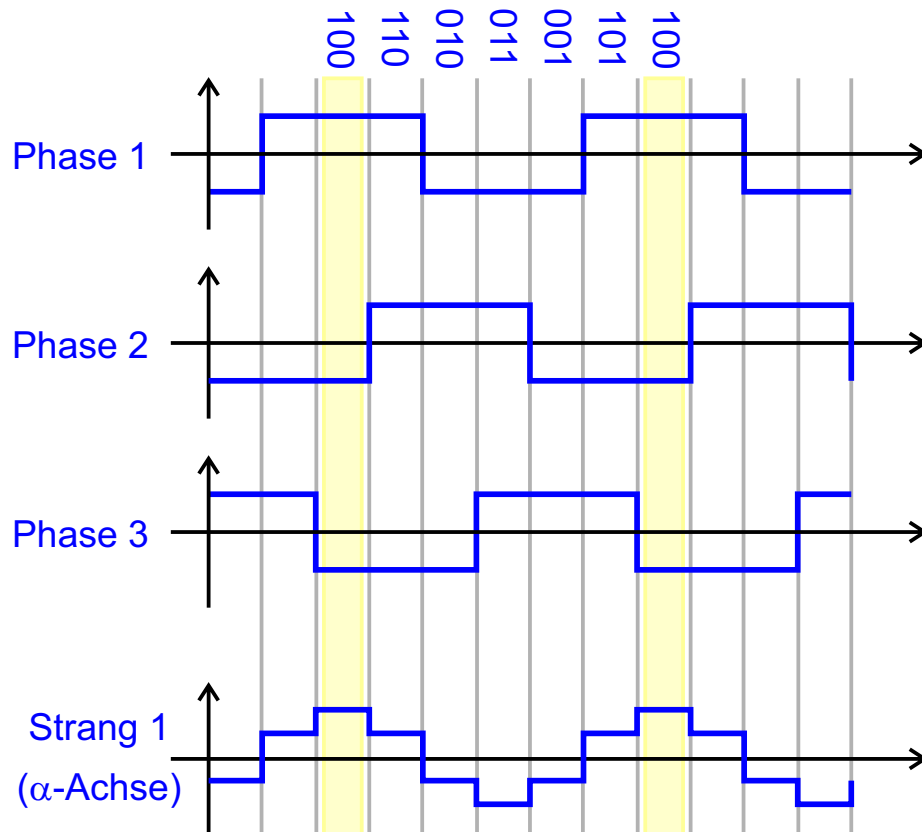
Darstellung der Schaltzustände als  
Spannungsraumzeiger im  $\alpha\beta$ -System



## 6.6 Raumzeigermodulation

### Blocktakt

Schaltzustände bei Blocktakt

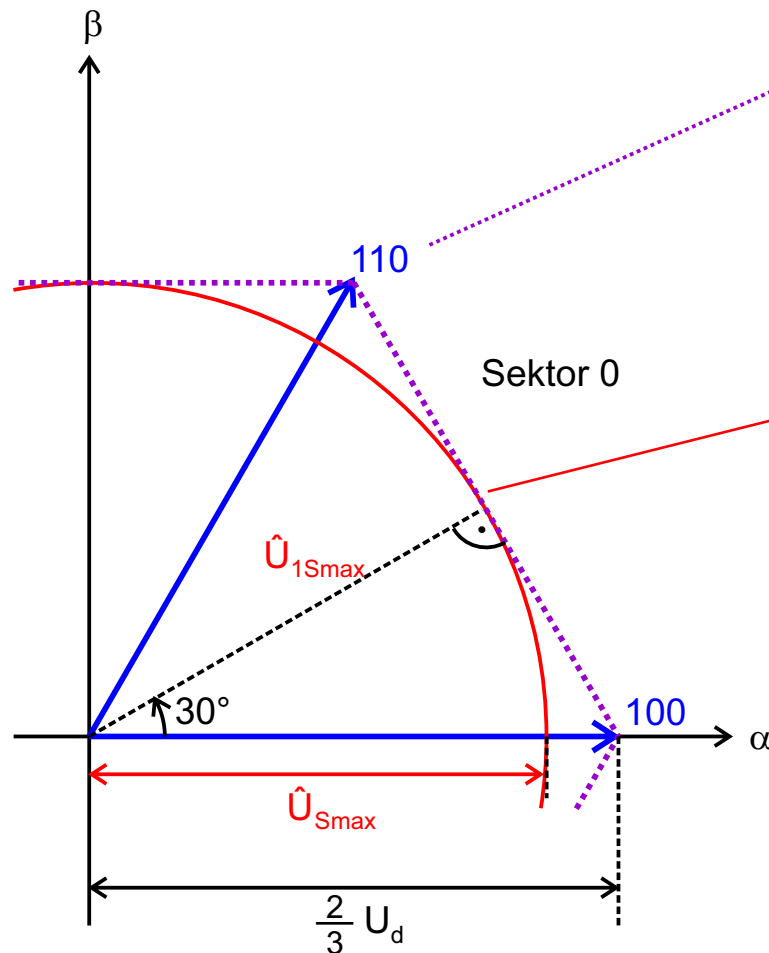


#### Raumzeigerbahn (RZ):

- **Blocktakt:** RZ springt auf den Außenpunkten
- **linearer Aussteuerbereich:** RZ läuft auf Kreisbahn  
Pulsen mit den benachbarten Schaltzuständen
- **Realisierung:** Erfordert spezielle Hardware ( $\mu$ C, FPGA))

## 6.6 Raumzeigermodulation

### Aussteuerbereiche



Vollaussteuerung (Blocktakt):  
Raumzeiger springt auf den Außenpunkten  
des Sechsecks: 100 - 110 - ...  
Kurvenform Strangspannung vgl. Seite 22

$$\hat{U}_{1Smax} = \frac{2}{\pi} \cdot U_d \approx 0.64 \cdot U_d$$

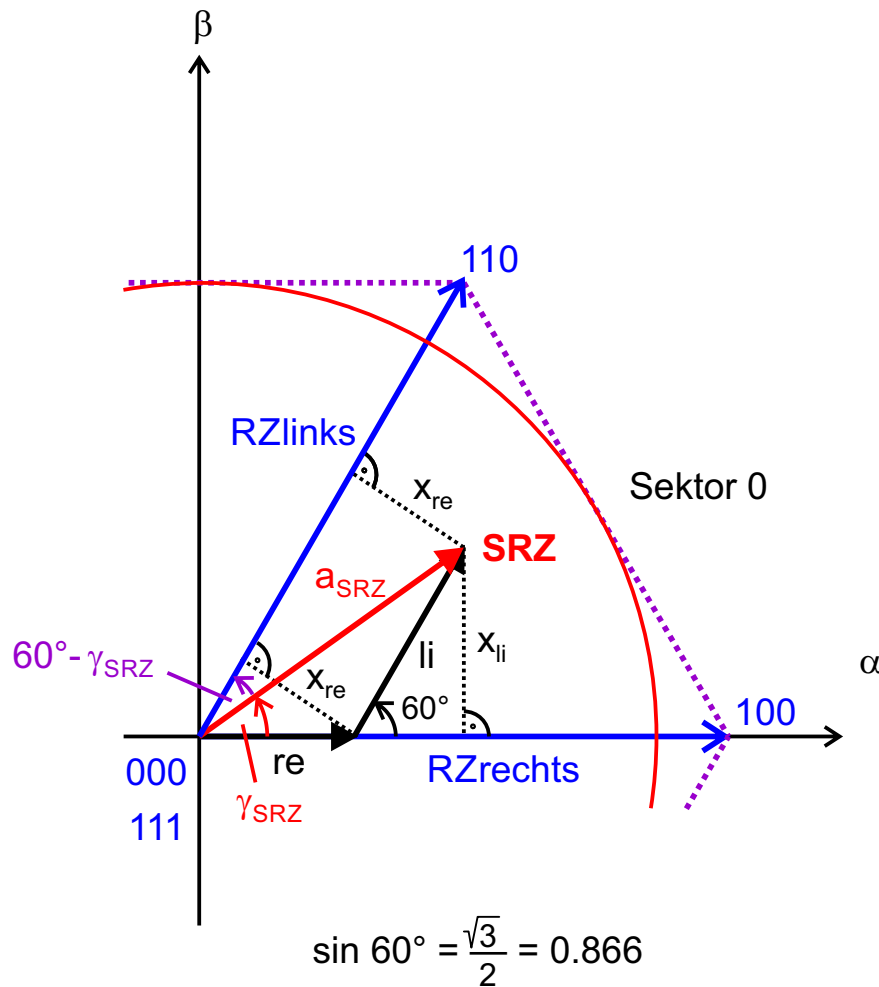
Grenze des linearen PWM-Aussteuerbereichs:  
Innenkreis des Sechsecks

$$\hat{U}_{1Smax} = \frac{2}{3} U_d \cdot \cos(30^\circ) \leftarrow \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_d \approx 0.58 \cdot U_d$$

## 6.6 Raumzeigermodulation

### Schaltzeiten aus Geometrie berechnen



Einschaltzeiten der benachbarten RZ entsprechen den Längen  $l_i$  und  $l_r$ :

$$\left. \begin{array}{l} \text{RZ links: } t_{\text{ein}} = t_{l_i} \\ \text{RZ rechts: } t_{\text{ein}} = t_{l_r} \\ \text{RZ Null: } t_{\text{ein}} = T_{\text{Takt}} - t_{l_i} - t_{l_r} \text{ (Rest)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{pro} \\ \text{Taktperiode} \\ T_{\text{Takt}} \end{array}$$

Geometrie mit  $l_i + l_r \leq 1$ :

$$\text{Sollraumzeiger } \mathbf{SRZ} = a_{\text{SRZ}} \cdot e^{j\gamma_{\text{SRZ}}} \quad \text{mit} \quad a_{\text{SRZ}} = 0 \dots \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$x_{l_i} = l_i \cdot \sin 60^\circ = a_{\text{SRZ}} \cdot \sin \gamma_{\text{SRZ}}$$

$$\Rightarrow l_i = \frac{2}{\sqrt{3}} a_{\text{SRZ}} \cdot \sin \gamma_{\text{SRZ}}$$

$$x_{l_r} = l_r \cdot \sin 60^\circ = a_{\text{SRZ}} \cdot \sin (60^\circ - \gamma_{\text{SRZ}})$$

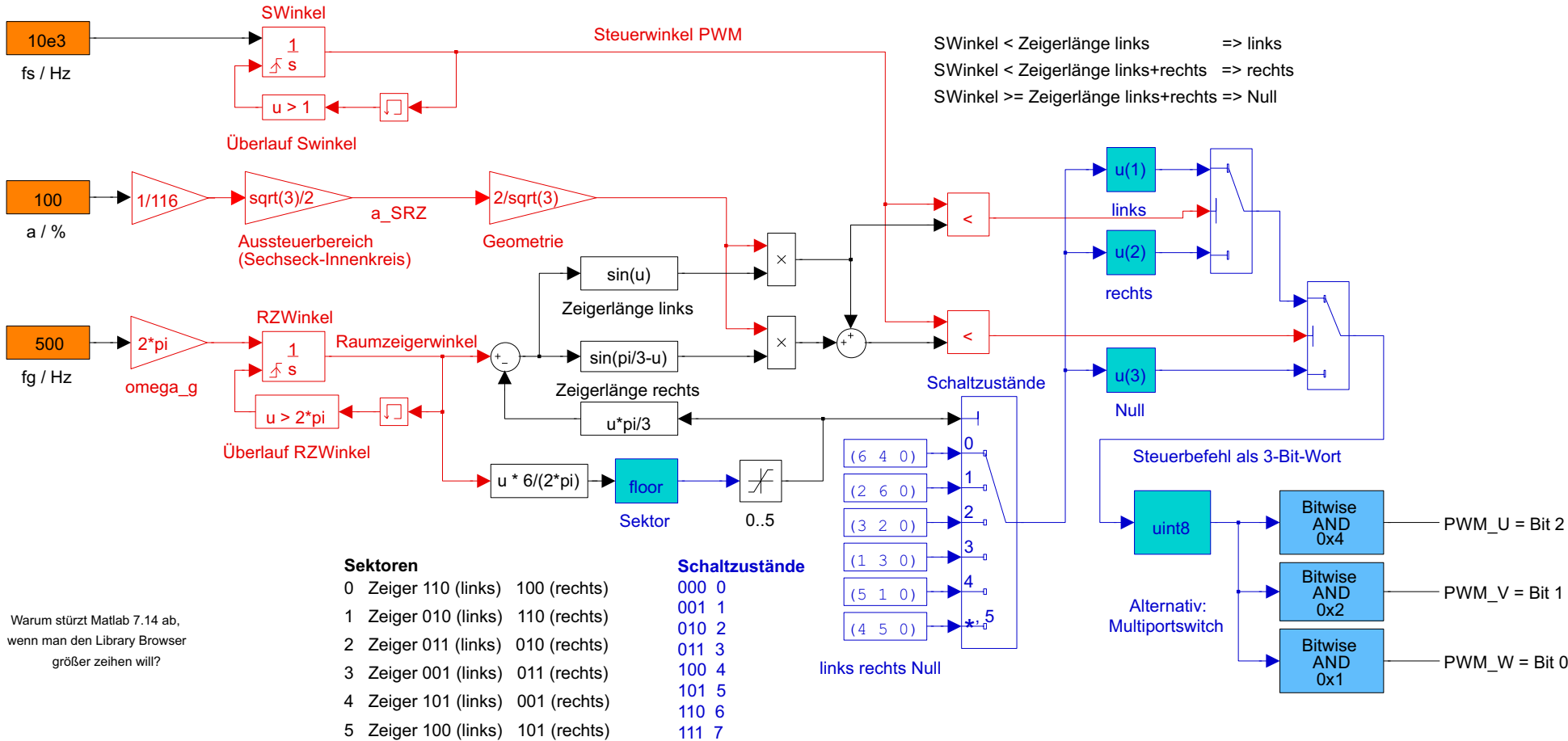
$$\Rightarrow l_r = \frac{2}{\sqrt{3}} a_{\text{SRZ}} \cdot \sin (60^\circ - \gamma_{\text{SRZ}})$$

$$\hat{U}_{1\text{Smax}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_d$$

für  $a_{\text{SRZ}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$

# 6.6 Raumzeigermodulation

## Beispielumsetzung in Simulink



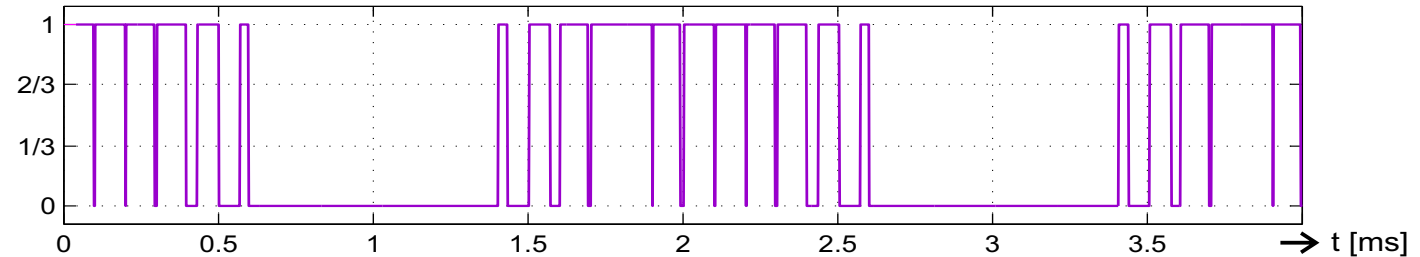
Warum stürzt Matlab 7.14 ab, wenn man den Library Browser größer zeihen will?

## 6.6 Raumzeigermodulation

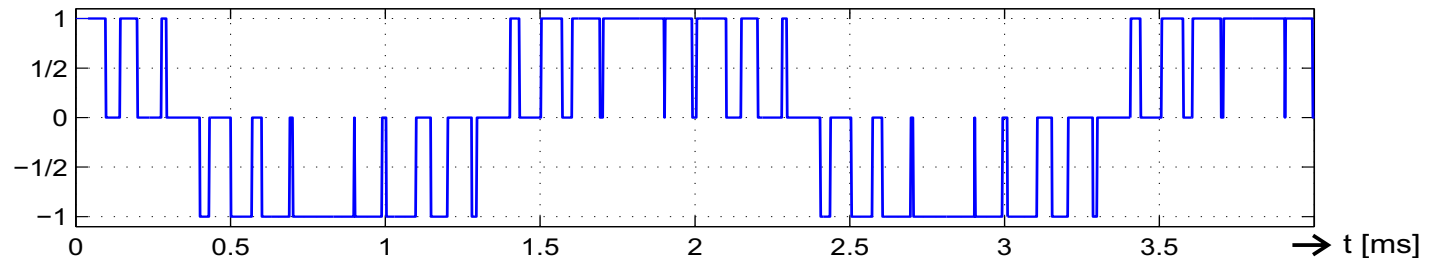
### typ. Pulsmuster

$f_T = 10\text{kHz}$   $f_g = 500\text{Hz}$   $a = 100\%$  Zwischenkreisspannung = 1

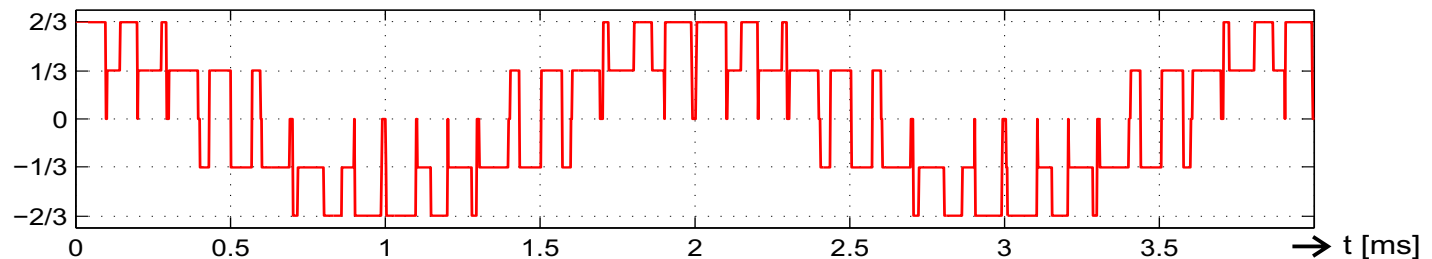
Pulsmuster Strang 1 bzw.  
WR-Ausgangsspannung  
 $U_{10}$  (Phase – ZK-Minus)



Außenleiterspannung  
 $U_{12}$  (Phase – Phase)



Strangspannung  
 $U_{s1}$  (Phase – Sternp.)



- RZM liefert Pulsmuster mit reduzierter Anzahl an Schaltvorgängen ( $U_{10}$ )
- linearer Verlauf des Aussteuergrades mit  $\hat{U}_{1S}$  bis in den Blocktakt