

# Anisotropiebasierte Positionsschätzung bei elektrischen Maschinen mithilfe der Sternpunktspannung

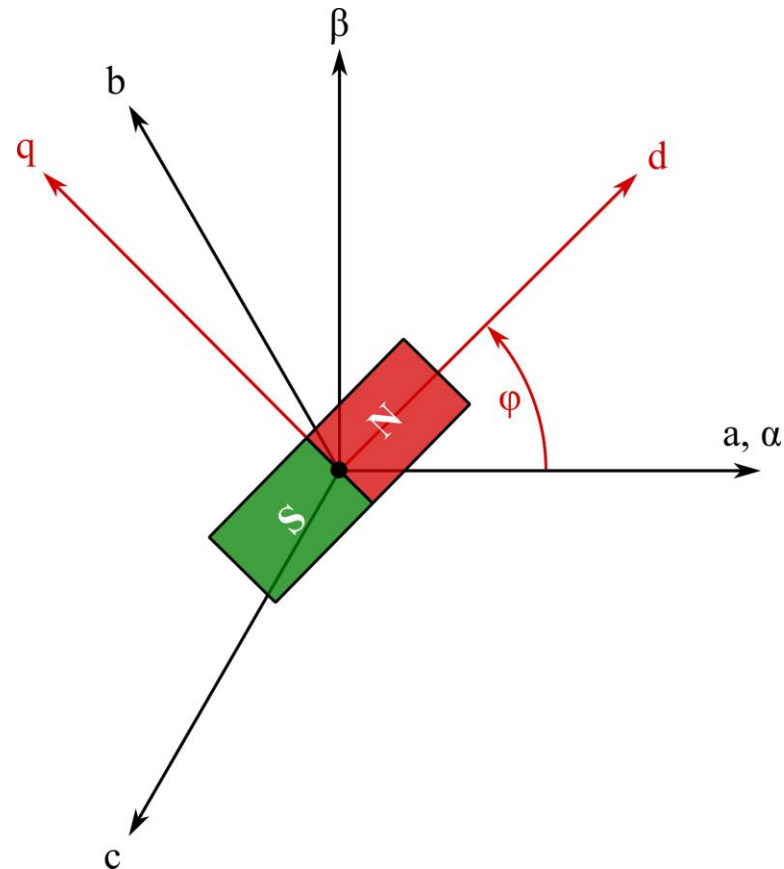


Wissenschaftliches Kolloquium  
Promotionskolleg Digitalisierung der Produktion  
27.10.2020

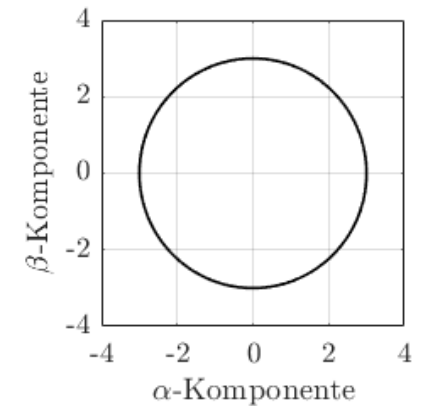
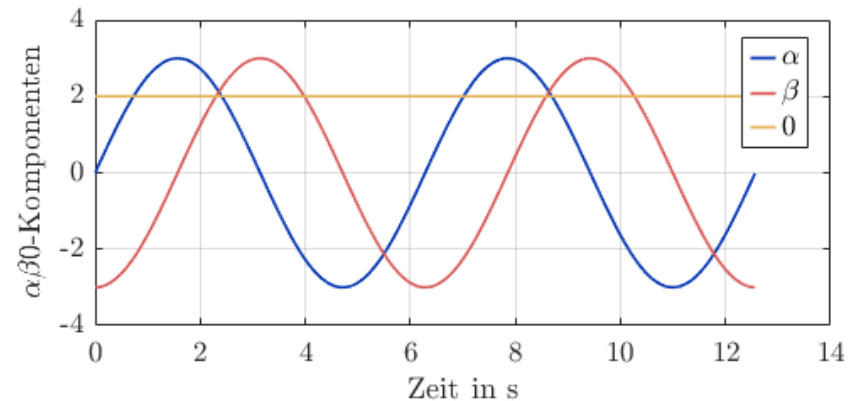
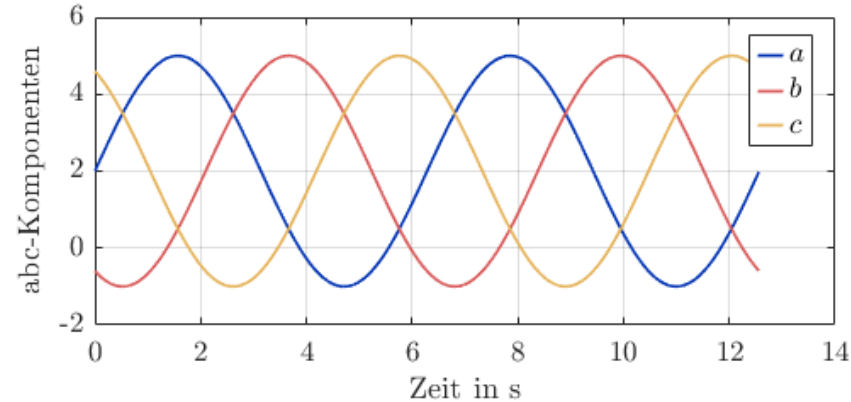
Klaus Schuhmacher  
Lehrstuhl für Antriebstechnik  
Universität des Saarlandes

- Grundlagen
- Anisotropiebasierte Positionsschätzung auf Basis der Sternpunktspannung
  - Modellierung
  - Übersicht über Verfahren und Beiträge in der Literatur
- Zusammenfassung / Ausblick

# Permanenterregte Synchronmaschine Aufbau und Koordinatensysteme



- Transformation vom physikalischen abc-System ins  $\alpha\beta 0$ -System
  - $\alpha\beta$ : orthogonale Komponenten
  - 0: Gleichanteil (Zero-Sequence)
- Vereinfacht viele Betrachtungen, insbesondere bei Annahme symmetrischer Maschinen  
→ Raumzeigerdarstellung



- **Positionsschätzung anhand der rückinduzierten Spannung**
  - Gut bei mittleren bis hohen Drehzahlen
  - Keine Schätzung im Stillstand ( $\omega = 0$ )
- **Positionsschätzung auf Basis magnetischer Anisotropie**
  - Basiert auf Positionsabhängigkeit der Induktivitäten
  - Stromableitung muss vorhanden sein
  - Schätzung bei Stillstand möglich

- Anregung (Signalform, -art, -frequenz...)
- Messung (Ströme oder deren Ableitungen, Spannungen, Abtastung)
- Signalverarbeitung (analoge/digitale Filter, Transformationen, ...)
- Positionsschätzung (arctan, Beobachter, PLL)

- Grundlagen
- Anisotropiebasierte Positionsschätzung auf Basis der Sternpunktspannung
  - Modellierung
  - Übersicht über Verfahren und Beiträge in der Literatur
- Zusammenfassung

Typischerweise besseres Signal-Rausch-Verhältnis möglich:

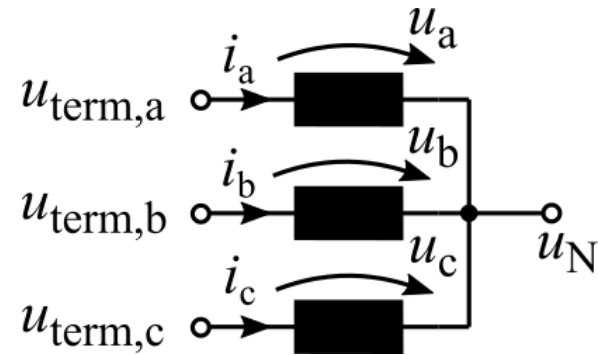
- Strommessung ist aufwendiger als Spannungsmessung, insbesondere wenn gleiche Bandbreite und gleiches Signal-Rausch-Verhältnis erzielt werden sollen
- Bei Injektion sinusförmiger Spannungen sinkt die Amplitude des gemessenen Stromes mit steigender Frequenz
- Für Verfahren mit direkter Winkelberechnung wird bei strombasierten Verfahren die Ableitung des Stromes benötigt

Aber:

- Zugang zum Sternpunkt nötig
- Andere Herausforderungen wie z. B. Schwingungsneigung durch parasitäre Kapazitäten



- Sternpunkt ermöglicht Messung der „Zero-Sequence Voltage“, welche nur bei Unsymmetrien im Motor auftritt



$$u_N = u_{\text{term},0} - u_0$$

$$u_0 = (u_a + u_b + u_c) / 3$$

$$u_{\text{term},0} = (u_{\text{term},a} + u_{\text{term},b} + u_{\text{term},c}) / 3$$

← Zero-Sequence Voltage

← Keine Positionsinformation,  
nachbildbar mit künstlichem Sternpunkt

- Verschiedene Möglichkeiten,  $u_0$  zu messen:
  - Aufsummieren der einzeln gemessenen Strangspannungen
  - Vergleich mit fester Vergleichsspannung (z. B. halbe Zwischenkreisspannung)
  - Vergleich mit künstlichem Sternpunkt
- Letztere Möglichkeit hat sich etabliert [1]-[2]

[1] F. Briz, M. W. Degner, P. Garcia, and J. M. Guerrero, *Rotor position estimation of AC machines using the zero sequence carrier signal voltage*, Oct. 2004.

[2] T. Werner, *Geberlose Rotorlagebestimmung in elektrischen Maschinen*. Dr.-Ing. dissertation, 2018.

$$\mathbf{u}_0 = -\begin{bmatrix} \kappa_\alpha & \kappa_\beta & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{term}}^s + \begin{bmatrix} \kappa_\alpha & \kappa_\beta & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{slow}}^s$$

$$\mathbf{u}_{\text{term}}^s = \begin{bmatrix} u_{\text{term},\alpha} \\ u_{\text{term},\beta} \\ u_{\text{term},0} \end{bmatrix}$$

$\kappa_\alpha, \kappa_\beta$  Induktivitätsverhältnisse

$$\mathbf{u}_{\text{slow}}^s = \left( \mathbf{R} \mathbf{i}^s + \omega \cdot \left( \frac{\partial}{\partial \varphi} \mathbf{L}^s \right) \cdot \mathbf{i}^s + \omega \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \boldsymbol{\Psi}_{\text{PM}}^s \right)$$

← Störender Anteil, wird durch entsprechende Maßnahmen separiert (Differenzbildung, Filter)

---

$$\mathbf{u}_{0,\text{HF}} = -\begin{bmatrix} \kappa_\alpha & \kappa_\beta & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{term, HF}}^s$$

← Nach Separierung verbleibt nur hochfrequenter Anteil

Verbreitetste vereinfachte Annahme der Induktivitätsmatrix in „natürlichen“ Koordinaten:

$$\mathbf{L}^p = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\Sigma} + 2L_{\Delta} \cos(2\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & L_{\Sigma} + 2L_{\Delta} \cos\left(2\varphi - \frac{4\pi}{3}\right) & 0 \\ 0 & 0 & L_{\Sigma} + 2L_{\Delta} \cos\left(2\varphi - \frac{8\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Mit diesen Annahmen folgt:

$$\kappa_{\alpha} = \frac{L_{\Delta}}{L_{\Sigma}^2 - L_{\Delta}^2} \left( -L_{\Sigma} \cos(-2\varphi) + L_{\Delta} \cos(4\varphi) \right)$$

$$\kappa_{\beta} = \frac{L_{\Delta}}{L_{\Sigma}^2 - L_{\Delta}^2} \left( -L_{\Sigma} \sin(-2\varphi) + L_{\Delta} \sin(4\varphi) \right)$$

Bei Annahme  $L_{\Delta} \ll L_{\Sigma}$  weitere Vereinfachung:

$$\kappa_{\alpha} \approx -\frac{L_{\Delta} L_{\Sigma}}{L_{\Sigma}^2 - L_{\Delta}^2} \cos(-2\varphi)$$

$$\kappa_{\beta} \approx -\frac{L_{\Delta} L_{\Sigma}}{L_{\Sigma}^2 - L_{\Delta}^2} \sin(-2\varphi)$$

# Zero-Sequence Voltage

## Vereinfachte Modellierung ohne 4. Harmonische

Unter den getroffenen Annahmen erhält man also folgenden zentralen Zusammenhang:

$$\begin{aligned} u_{0,\text{HF}} &= - \begin{bmatrix} \kappa_\alpha & \kappa_\beta & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{term, HF}}^s \\ &\approx \frac{L_\Delta L_\Sigma}{L_\Sigma^2 - L_\Delta^2} \cos(-2\varphi) \cdot u_{\text{term, HF}, \alpha} \\ &\quad + \frac{L_\Delta L_\Sigma}{L_\Sigma^2 - L_\Delta^2} \sin(-2\varphi) \cdot u_{\text{term, HF}, \beta} \end{aligned}$$

# Zero-Sequence Voltage

## Vereinfachte Modellierung ohne 4. Harmonische

Unter den getroffenen Annahmen erhält man also folgenden zentralen Zusammenhang:

$$\boxed{u_{0,\text{HF}}} = - \begin{bmatrix} \kappa_\alpha & \kappa_\beta & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{term, HF}}^s$$

Messgröße

$$\approx \frac{L_\Delta L_\Sigma}{L_\Sigma^2 - L_\Delta^2} \cos(-2\varphi) \cdot u_{\text{term, HF}, \alpha}$$
$$+ \frac{L_\Delta L_\Sigma}{L_\Sigma^2 - L_\Delta^2} \sin(-2\varphi) \cdot u_{\text{term, HF}, \beta}$$

Proportionalitätsfaktor

Positionsinformation

Anregung

- Grundlagen
- Anisotropiebasierte Positionsschätzung auf Basis der Sternpunktspannung
  - Modellierung
  - Übersicht über Verfahren und Beiträge in der Literatur
- Zusammenfassung

1997 [1-2] (Asynchronmaschine)

2000 [3] (Asynchronmaschine)

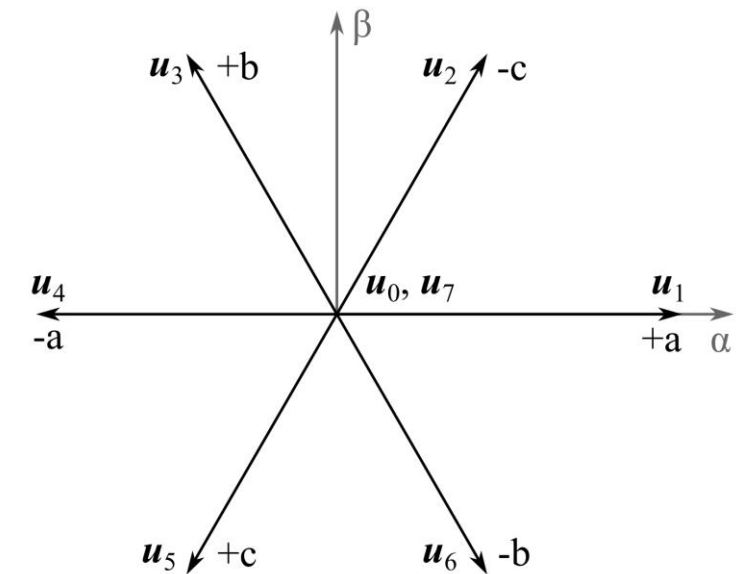
**Anregung:** PWM-basiert,  
lediglich aktive Raumzeiger werden für Messung genutzt

**Signalverarbeitung:**

- Differenzbildung gegenüberliegender Spannungszeiger innerhalb kurzer Zeit
- $\kappa_a, \kappa_b, \kappa_c$  werden über 6 PWM-Perioden bestimmt
- Clarke-Transformation  $\rightarrow \kappa_\alpha, \kappa_\beta$

**Positionsschätzung:** arctan-Funktion

- Erfordert Modifikation der Raumzeigermodulation
- Messung von  $u_0$  muss mit PWM synchronisiert werden



$$u_{0,\text{HF}} = - \begin{bmatrix} \kappa_a & \kappa_b & \kappa_c \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{term},\text{HF}}^{\text{P}}$$

$$\Delta u_0 = - \begin{bmatrix} \kappa_a & \kappa_b & \kappa_c \end{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_{\text{term}}^{\text{P}}$$

$$-\left(u_0(\mathbf{u}_1) - u_0(\mathbf{u}_4)\right) = \kappa_a u_{\text{DC}}$$

[1] J. Jiang and J. Holtz, *Accurate estimation of rotor position and speed of induction motors near standstill*, May 1997.

[2] J. Holtz, Jinsheng Jiang, and Hangwen Pan, *Identification of rotor position and speed of standard induction motors at low speed including zero stator frequency*, Nov. 1997.

[3] J. Jiang, *Drehgeberlose feldorientierte Regelung für Asynchronmaschinen bei Ständerfrequenz Null*. Dr.-Ing. Dissertation, 2000.

1999-2000: [1] (Asynchronmaschine), [2] (PMSM)

**Anregung:** Injektion eines rotierenden Spannungszeigers

**Signalverarbeitung:** analoger Bandpassfilter zur Isolation der Antwort auf die injizierte Spannung

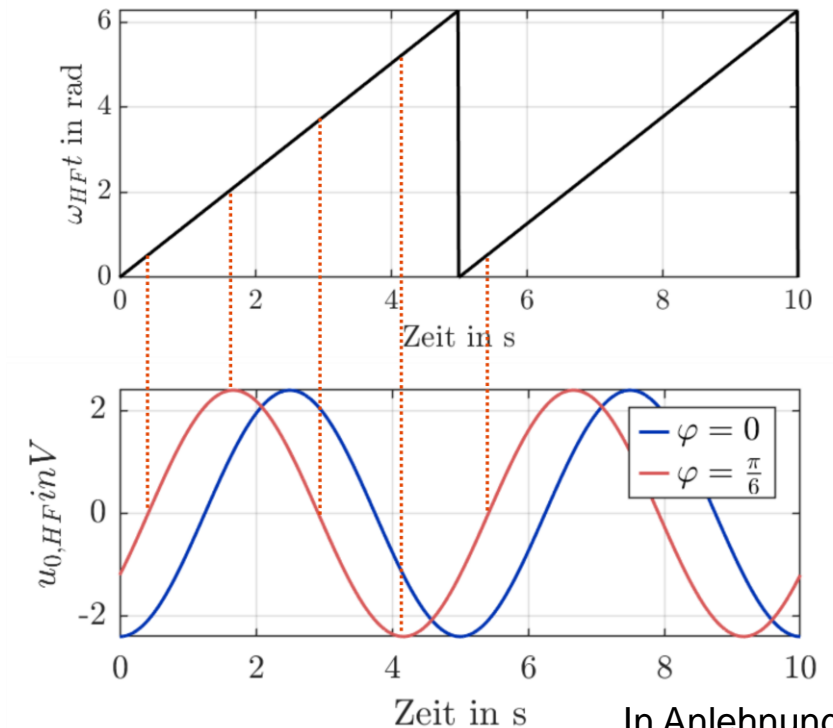
**Positionsschätzung:**

- Detektion von Minimum, Maximum und Nulldurchgang
- alternativ Phasenregelschleife (PLL)

- Keine Modifikation der SVM notwendig
- Relativ hoher Schaltungsaufwand

$$u_{0,HF} = - \begin{bmatrix} \kappa_\alpha & \kappa_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{DC} \cos(\omega_{HF}t) \\ u_{DC} \sin(\omega_{HF}t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\approx -u_{DC} \frac{L_\Sigma L_\Delta}{L_\Sigma^2 - L_\Delta^2} \cos(\omega_{HF}t + 2\varphi)$$



In Anlehnung an [2]

[1] A. Consoli, G. Scarcella, and A. Testa, *A new zero frequency flux position detection approach for direct field oriented control drives*, Sep. 1999.

[2] A. Consoli, G. Scarcella, G. Tutino, and A. Testa, *Zero frequency rotor position detection for synchronous PM motors*. 2000.



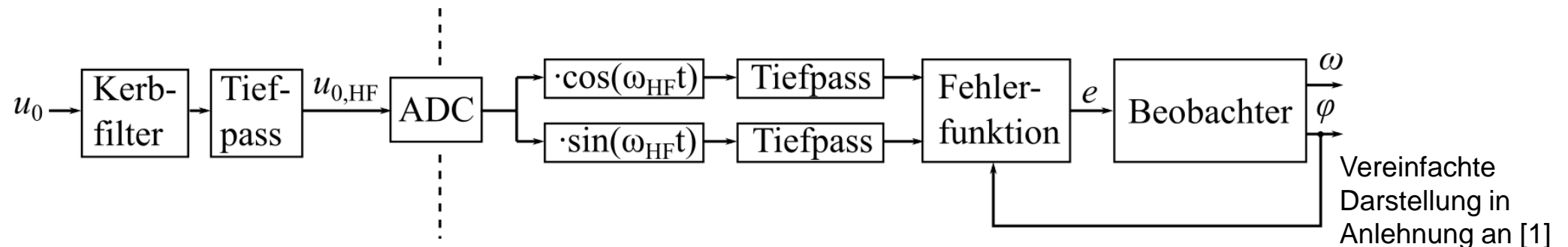
2004: [1] (Asynchronmaschine)

### Signalverarbeitung:

- analoger Bandpassfilter ersetzt durch Kerbfilter und Tiefpassfilter
- Multiplikation von  $u_{0,HF}$  mit ebenfalls rotierendem Zeiger, Tiefpassfilter

### Positionsschätzung:

- Fehlerfunktion und Beobachter zur Schätzung von Drehzahl und Position
- Kontinuierliche Positionsschätzung, geringerer Einfluss durch Phasenverschiebung



- geringerer Einfluss der Phasenverschiebung durch andere Filterung
- Digitale Verarbeitung → eröffnet mehr Möglichkeiten, um bspw. Harmonische zu separieren

[1] F. Briz, M. W. Degner, P. Garcia, and J. M. Guerrero, *Rotor position estimation of AC machines using the zero sequence carrier signal voltage*, Oct. 2004.

2011-2013: [1]-[2] (PMSM)

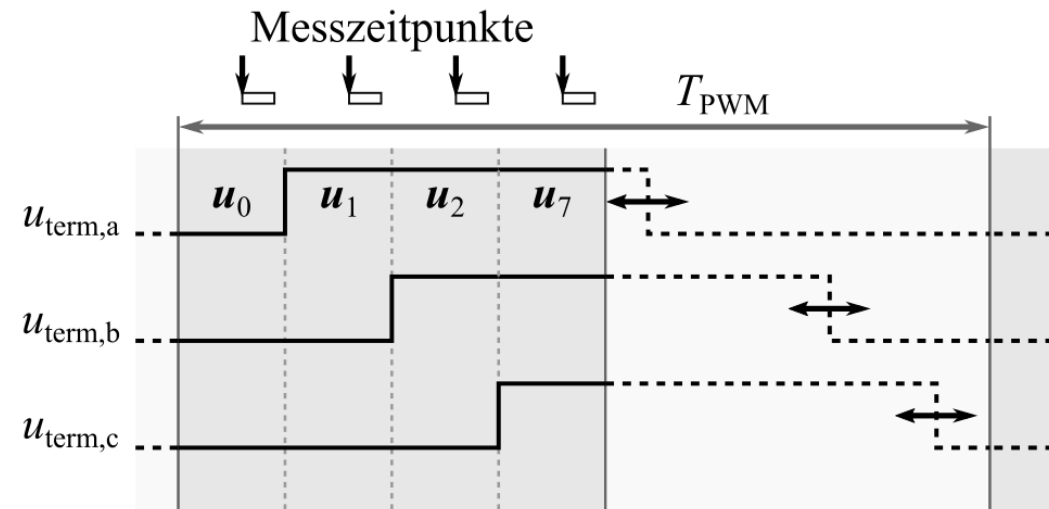
## Anregung:

- SVM wird anders modifiziert als bei Jiang/Holtz, zwei unterschiedliche Möglichkeiten werden vorgestellt
- Nur ein Schaltvorgang zwischen Messungen

**Signalverarbeitung:** Differenzbildung bei unterschiedlichen Spannungszeigern

**Positionsschätzung:** arctan-Funktion

- Anwendung auf PMSMs
- Winkelberechnungsverfahren unter Berücksichtigung der 4. Harmonischen



Variante aus [1], mit vier „Messvektoren“ pro PWM-Periode

[1] P. Thiemann et al., *New sensorless rotor position detection technique of PMSM based on direct flux control*, May 2011.

[2] C. Mantala, *Sensorless control of brushless permanent magnet motors*, Ph.D. dissertation, 2013.

2016: [1]-[2] (PMSM)

### Anregung:

- Sinus-, bzw. Rechteck-Signal in Richtung der geschätzten Anisotropieachse ( $-2\varphi$ )

### Signalverarbeitung:

- Multiplikation mit gleichem Signal, Tiefpassfilter

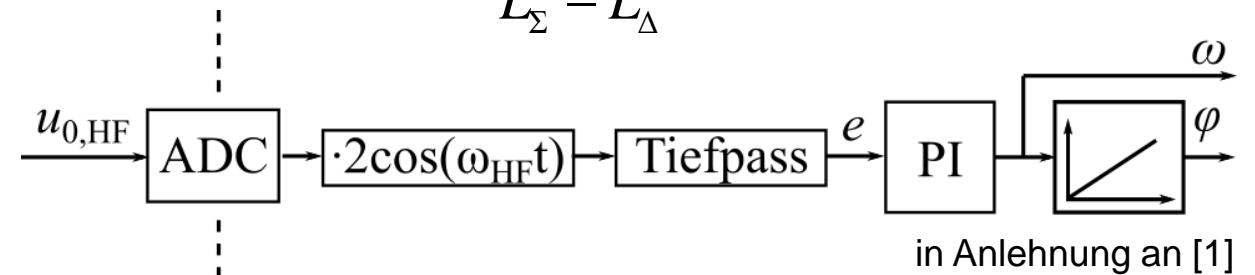
### Positionsschätzung:

- PI-Regler regelt Positionsfehler zu 0

Sinusförmige Anregung:

$$u_{0,\text{HF}} \approx -u_{\text{DC}} \frac{L_{\Sigma} L_{\Delta}}{L_{\Sigma}^2 - L_{\Delta}^2} \cdot \cos(\omega_{\text{HF}} t) \cdot \sin(2\Delta\varphi)$$

$$e \approx -u_{\text{DC}} \frac{L_{\Sigma} L_{\Delta}}{L_{\Sigma}^2 - L_{\Delta}^2} \cdot \sin(2\Delta\varphi)$$



- Signal-Demodulation weniger aufwendig im Vergleich zu rotierender Injektion
- Einfluss der Raumzeigermodulation wurde nicht betrachtet, in realer Anwendung wäre auch hier analoge Filterung nötig

[1] P. L. Xu and Z. Q. Zhu, *Novel Carrier Signal Injection Method Using Zero-Sequence Voltage for Sensorless Control of PMSM Drives*, Apr. 2016.

[2] P. L. Xu and Z. Q. Zhu, *Novel Square-Wave Signal Injection Method Using Zero-Sequence Voltage for Sensorless Control of PMSM Drives*, Dec. 2016.

## 2018 [1] (PMSM)

Schwerpunkt auf analytischen Betrachtungen zur sensorlosen Regelung von PMSMs mit Fokus auf Zero-Sequence Voltage:

- Vergleich verschiedener Ansätze, bspw. von Sternpunktspannung- und Strommessung, von anderen Möglichkeiten der Spannungsmessung, von unterschiedlichen Arten der Anregung
- Kompensation der 4. Harmonischen mittels neuronalem Netz
- PWM-basierter Ansatz „ohne Modifizierung“ der Raumzeigermodulation

[1] T. Werner, „Geberlose Rotorlagebestimmung in elektrischen Maschinen,“ Dr.-Ing. Dissertation, 2018.

- Fokus auf PWM-basierter Anregung, erste Veröffentlichungen 2014
- Verbesserungen zur Positionsberechnung unter Berücksichtigung der 4. Harmonischen und zur initialen Positionsbestimmung
- Optimierung des Maschinendesigns für den sensorlosen Betrieb
- Prototypische Überführung in Industrieanwendungen im Rahmen von Forschungsprojekten
- Alternativer Messansatz mittels Integration der Sternpunktspannung
- Allgemeine analytische Untersuchungen

## Zusammenfassung:

- Unterschiede der Verfahren können im Wesentlichen gegliedert werden in:
  - Anregung
  - Messung
  - Signalverarbeitung
  - Positionsschätzung
- Fokus PWM-basiert → kontinuierliche Injektion → PWM-basiert
  - bei den sternpunktbasierten Verfahren, aber auch bei den strombasierten Verfahren
- Sensorlose Regelung mithilfe der Sternpunktspannung nach wie vor eher Nischenthema gegenüber strombasierten Verfahren

## Ausblick:

- Vergleich bekannter und neuartiger Modifikationen der Raumzeigermodulation

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!