

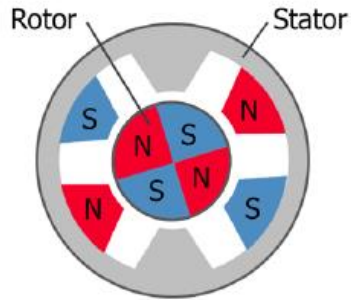
# Magnetic Sensor Characterization and Signal Conditioning for Position and Speed Estimation of BLDC Motors

**Bearbeiter:** Julien Aziz  
**Betr. Mitarbeiter:** Jana Mayer, Ajit Basarur  
**Referent:** Uwe D. Hanebeck

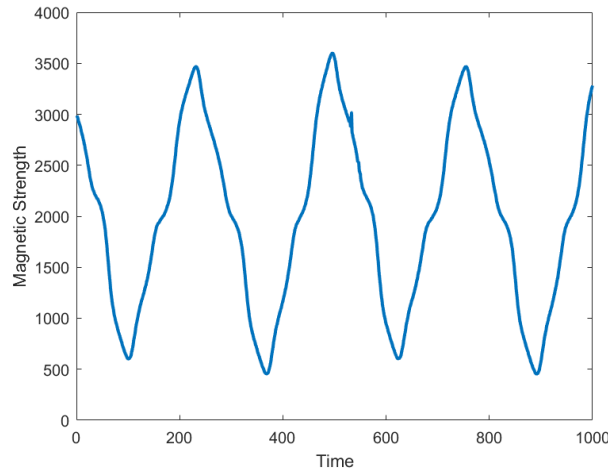
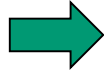
Intelligent Sensor-Actuator-Systems Laboratory (ISAS),  
Institute for Anthropomatics and Robotics,  
Karlsruhe Institute of Technology (KIT),  
Karlsruhe, Germany

- 1. Motivation**
- 2. Sensor Position**
- 3. Signal Rekonstruktion**
- 4. Schätzmodell**
- 5. Evaluation**
- 6. Fazit und Ausblick**

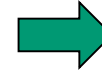
# Motivation



Messung



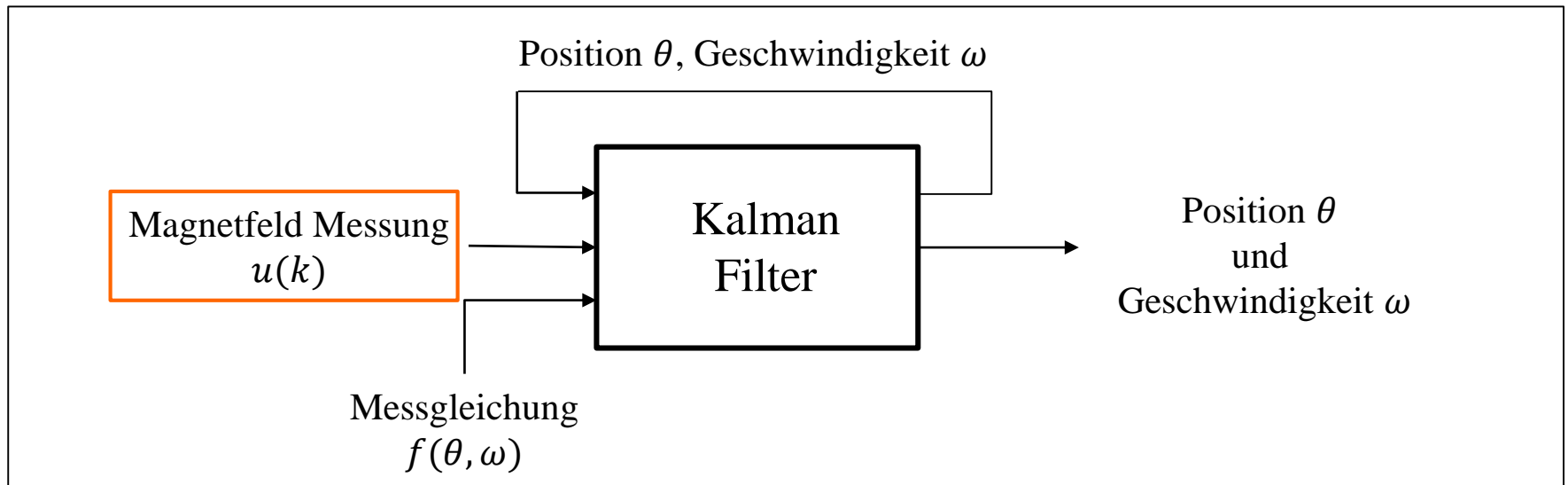
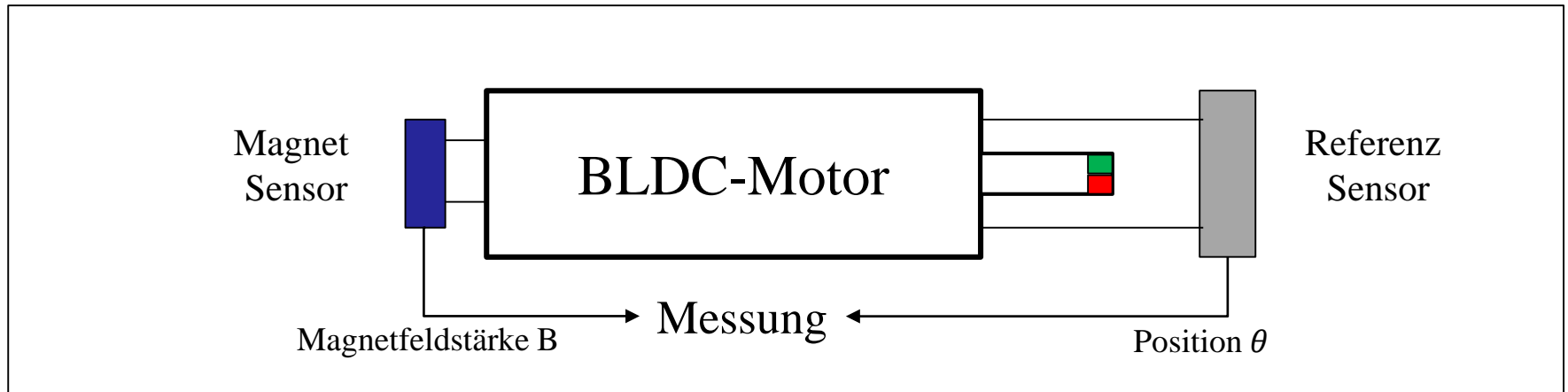
Schätzung



**Rotor Position  
und  
Geschwindigkeit**

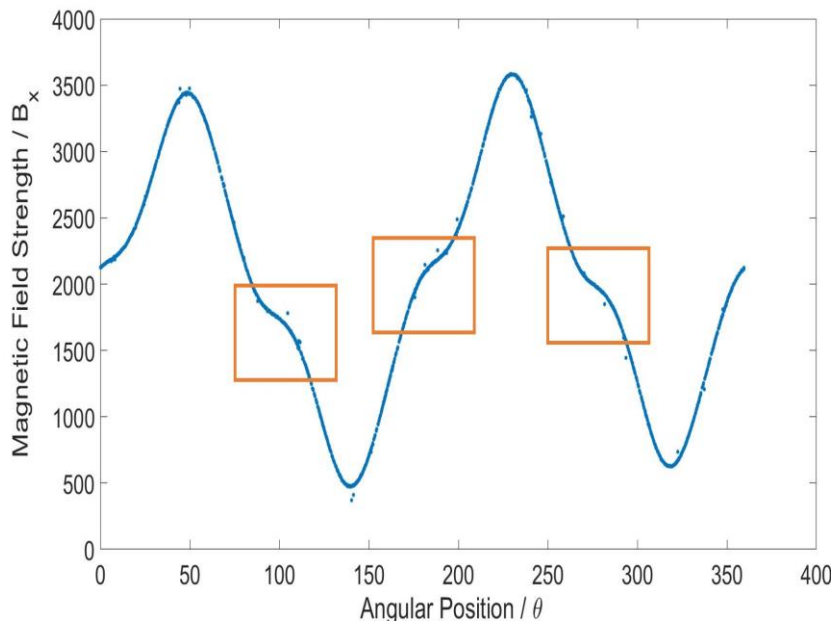
- Ziel: Präzise Bestimmung der Rotorposition von BLDC-Motoren anhand des Magnetfelds in Echtzeit

# Motivation – Vorherige Arbeiten



1.

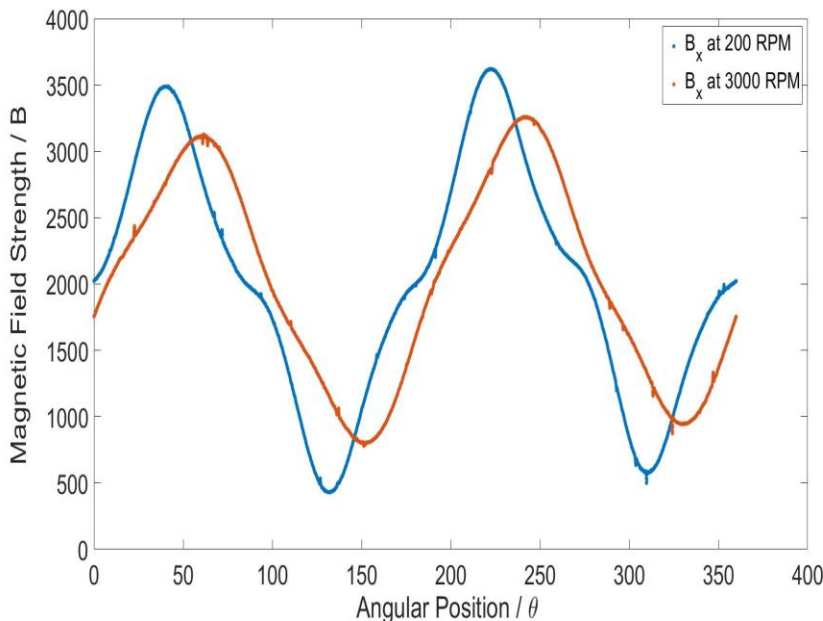
## Signalverformung



- Erwartung:  
Abbildung: Winkel -> Magnetstärke  
ist eine glatte Sinuskurve
- Ist:  
Verformungen an mehreren  
Punkten
- Ursache:  
Induktion an den Motorspulen

2.

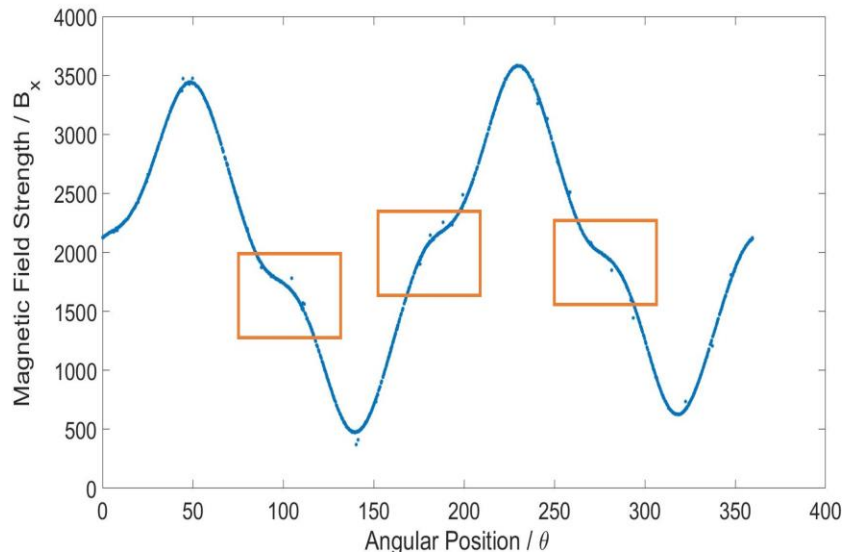
## Geschwindigkeitsabhängigkeit



- Erwartung:  
Winkelspezifische Magnetfeldstärke  
für jede Geschwindigkeit gleich
- Ist:  
Geschwindigkeitsabhängige  
Phasenverschiebung
- Ursache:  
Tiefpassfilter des Sensors

1.

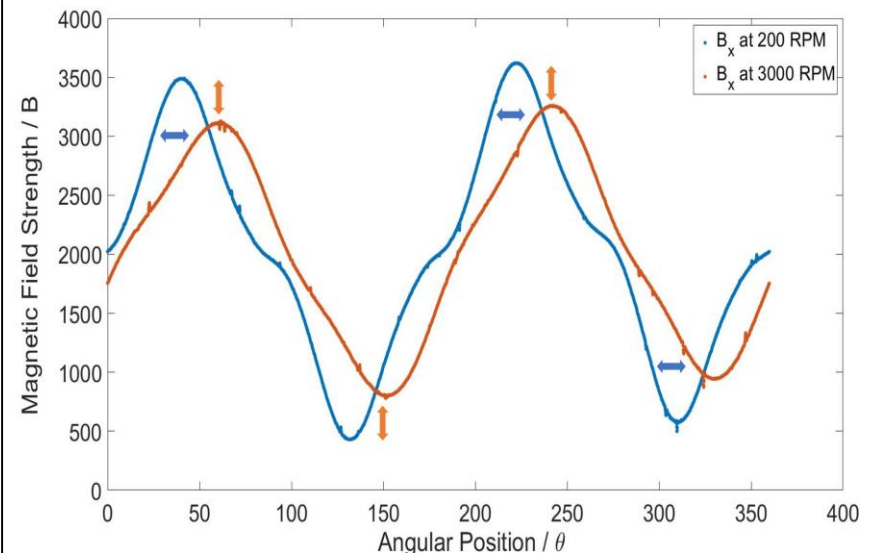
## Verformung



### Lösungsansatz:

- Charakterisierung des Magnetflusses
- Neue Sensorposition um ungewollte Einflüsse zu vermeiden

## 2. Geschw.abhängigkeit



### Lösungsansatz:

- Approximation des ungefilterten Signals
- System konstruieren welches ein unabhängiges Signal erzeugt

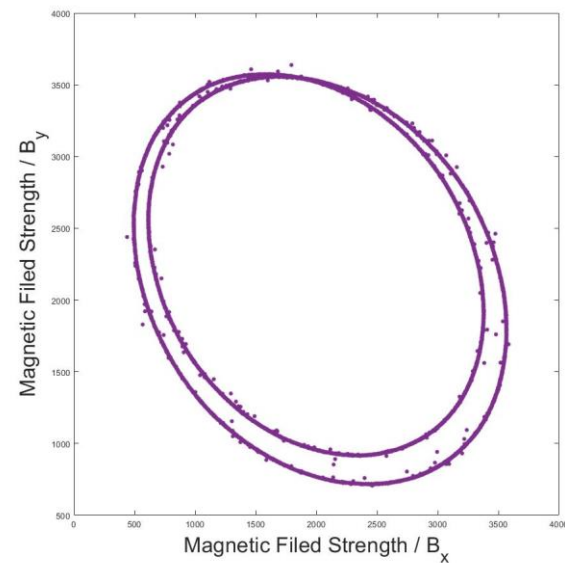
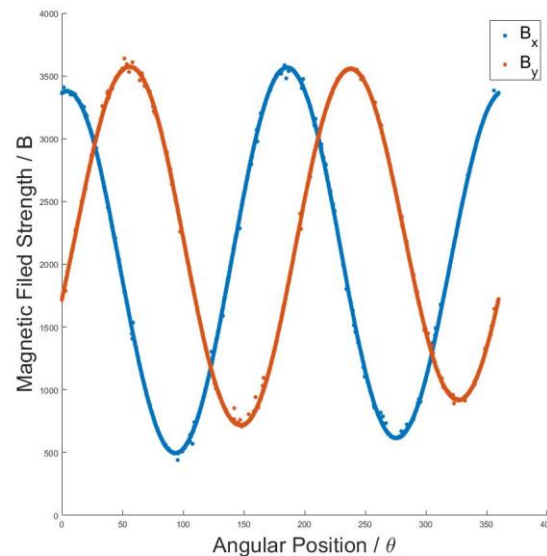


Ermöglicht die Verwendung einfacher Messmodelle mit geringer Komplexität

# Sensor Position - Magnetfeldmessung

- Ziel: Messung des Magnetfeldes produziert von den rotierenden Permanentmagneten

- Idealfall:

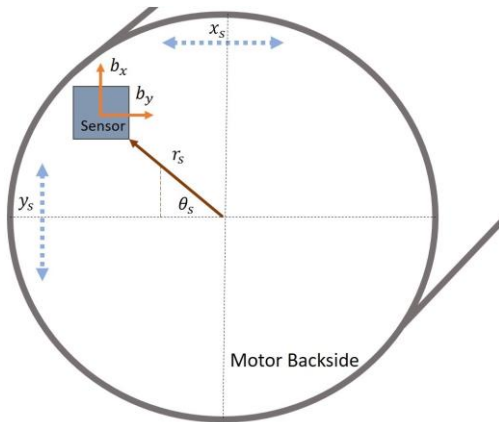


- Problem:
  1. Magnetfluss der Permanentmagneten nicht gleichmäßig verteilt
  2. Unerwünschte Störungen durch elektromagnetische Induktion

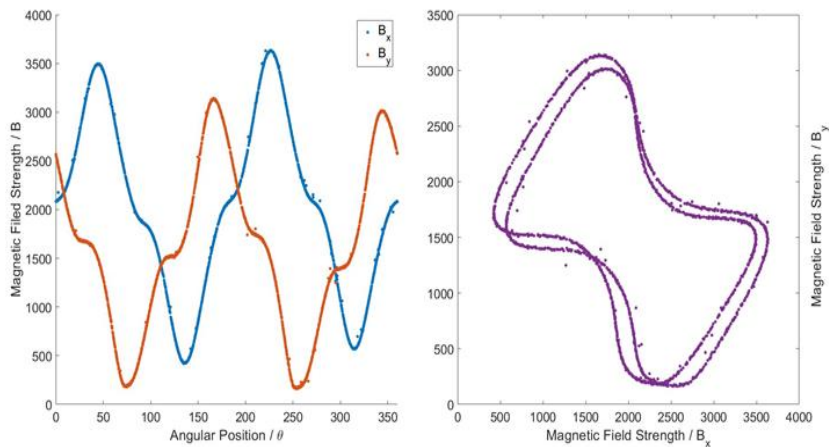


# Sensor Position - Magnetfeldmessung

## ■ Alte Position:

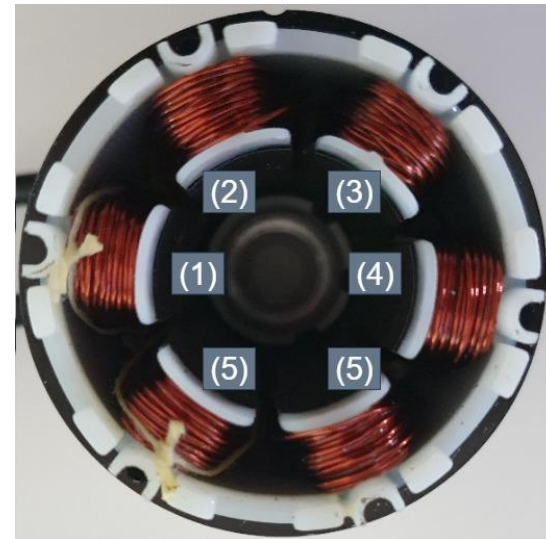


## ■ Messung:

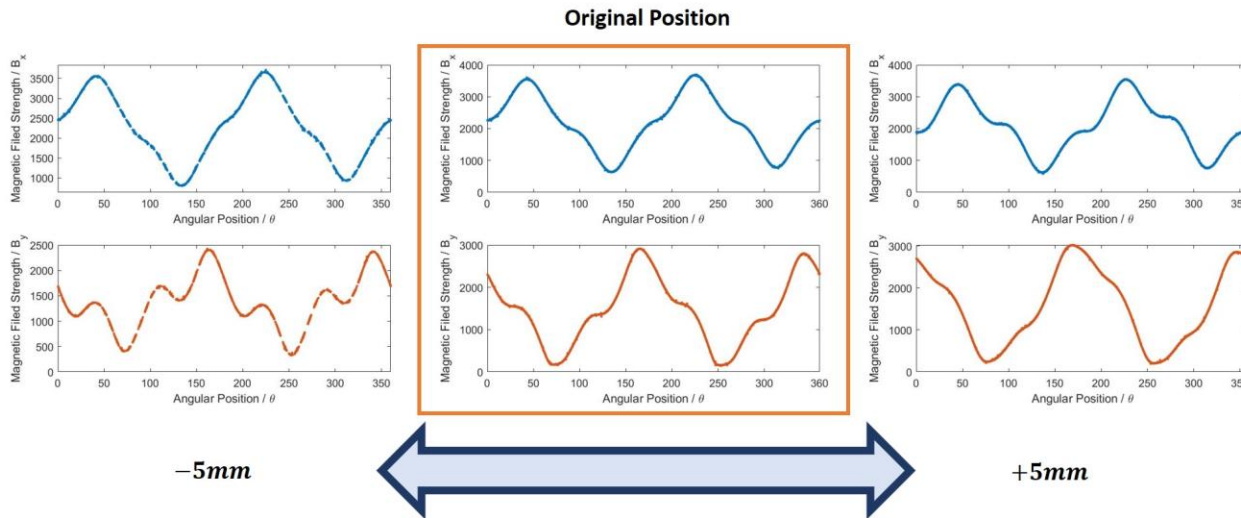


## ■ Positionsänderung

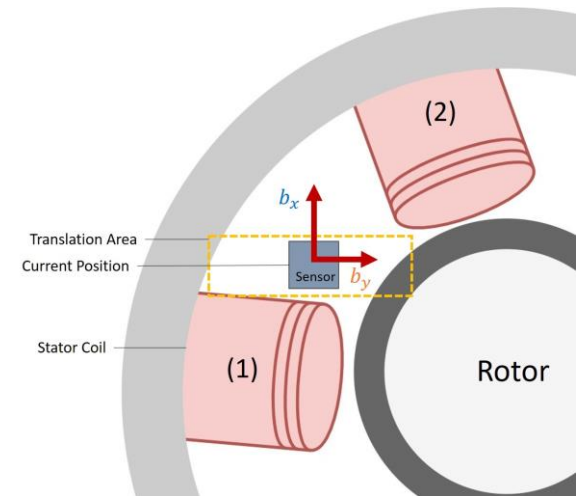
1. Horizontale Translation entlang  $x_s$
  2. Vertikale Translation entlang  $y_s$
- Berücksichtigung der Spulenverteilung



# Sensor Position - Translation

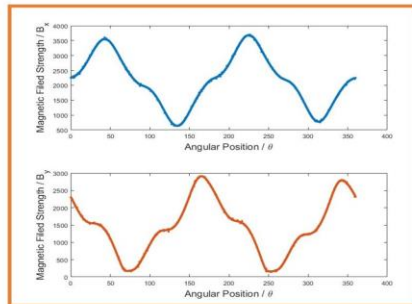


- Signal  $B_x$ :
  - Kaum Veränderung in beide Translationsrichtungen
- Signal  $B_y$ :
  - Starke Deformation bei Translation zum Stator
  - Verringerung der Störung bei Translation zum Rotor
- Grund: Räumliche Beziehungen zwischen Messachsen und Spulen

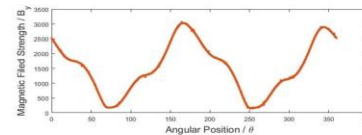
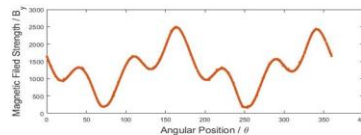
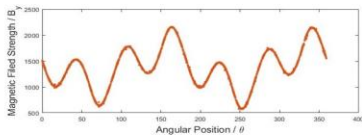
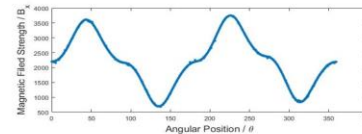
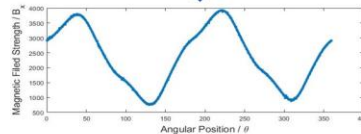
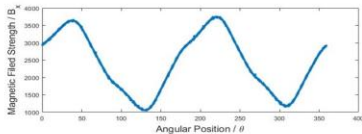


# Sensor Position - Translation

Original Position



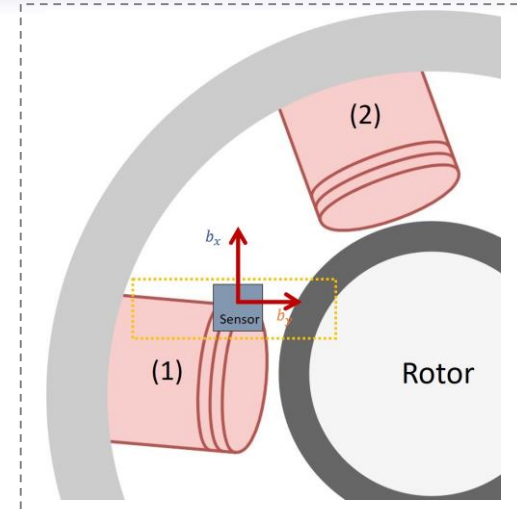
-2.5mm



-5mm



+5mm



- Signal  $B_x$ :
  - Verringerung der Deformation nach vertikaler Translation
- Signal  $B_y$ :
  - Vorherige Beobachtung noch deutlicher

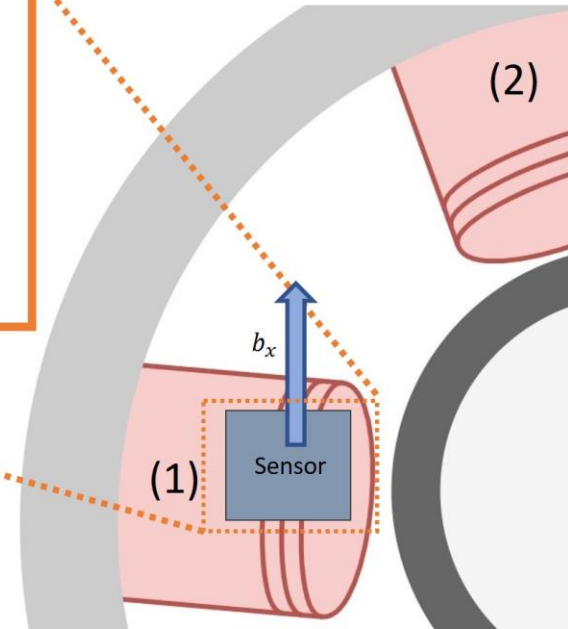
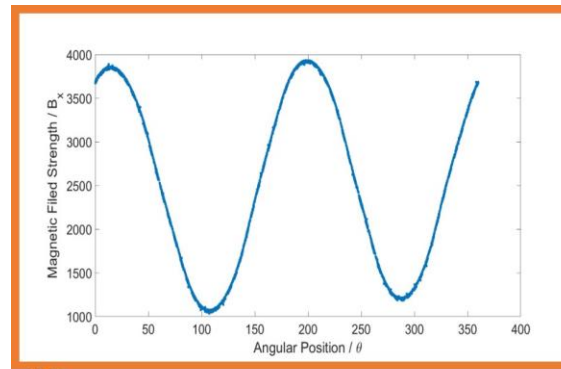
# Sensor Position – Exklusive Messrichtung

- Vertikale Translation bis Sensor auf Spule (1) liegt

- Fast orthogonale Beziehung zwischen Messrichtung und Spule

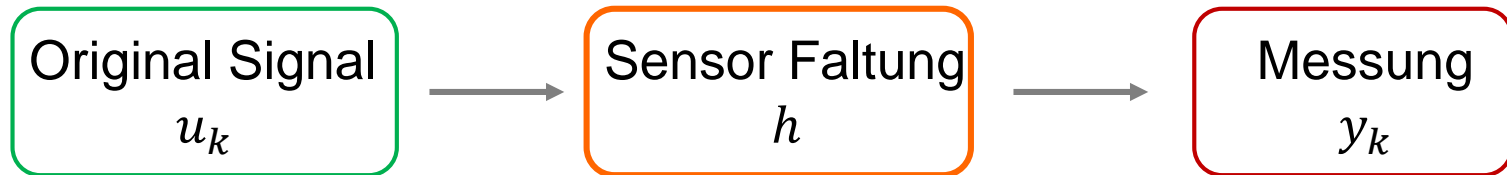
➡ Ungestörtes sinusoides Signal  $B_x$

- Idee: Nutzung einer exklusiven Messachse  $b_x$  für das Schätzmodell
  - Sensor Positionen mit sinusoidem Signal  $B_x$
  - Verringerung der Komplexität durch Reduktion der Dimension



# Signal Verarbeitung - Approximation

- Problem: Tiefpassfilter verursacht ungewollte Geschwindigkeitsabhängigkeit

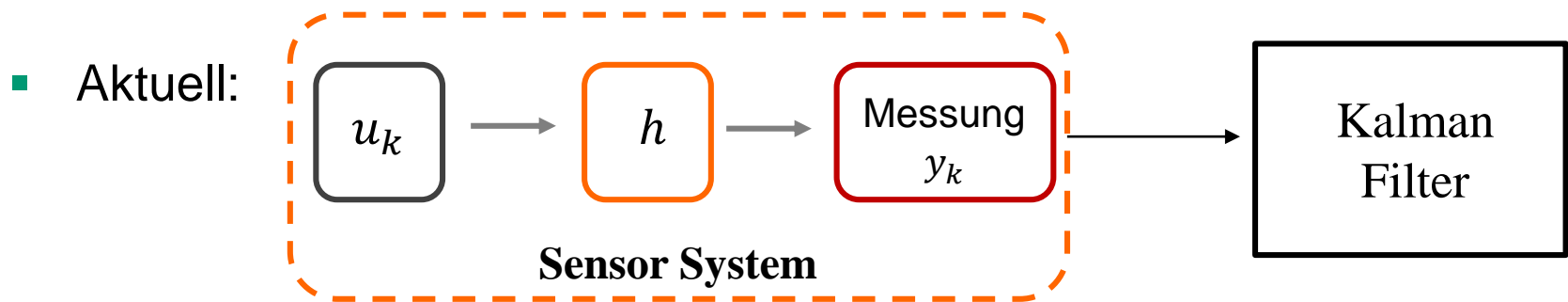


- Signale bei niedrigen Geschwindigkeiten nahezu ungefiltert
- Übertragung dieses Verhaltens auf alle Geschwindigkeiten

➡ Approximation von Ein-Ausgabe-Paaren  
 $(\hat{u}_k, \hat{y}_k)$

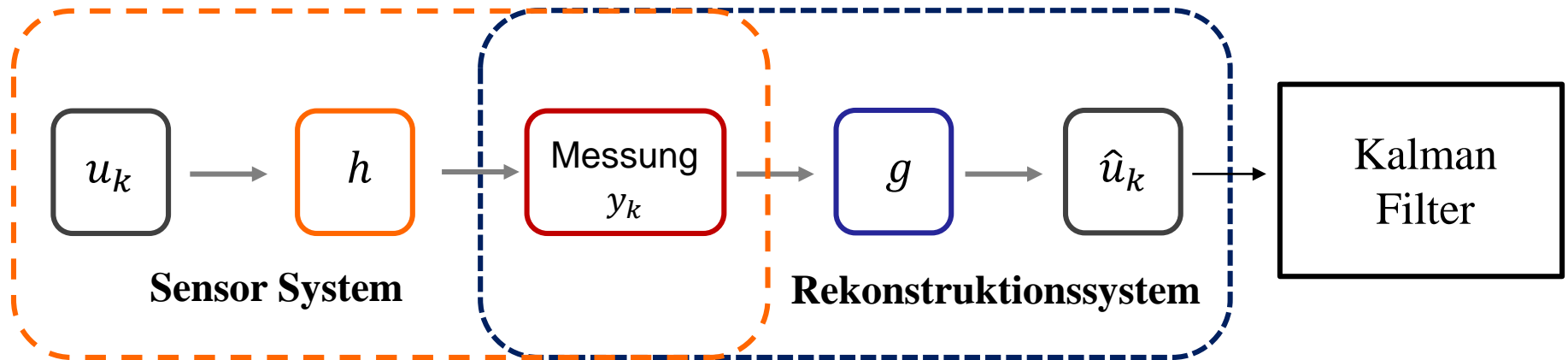
# Signal Verarbeitung – Rekonstruktion

- Idee: Transformation der Messung  $y(k)$  während des Schätzprozesses



- Identifikation eines neuen Systems  $g$ 
  - Eingabe ist Messung  $y_k$
  - Ausgabe soll möglichst präzise Schätzung des ungefilterten Signals  $u_k$  sein
  - $\hat{u}_k = g * y_k = g * h(u_k)$
  - $\hat{u}_k$  idealer Weise Geschwindigkeitsunabhängig

# Signal Verarbeitung – Rekonstruktion



- Identifikation von  $g$  mithilfe der approximierten Ein-Ausgabe-Paare  $(\hat{u}_k, \hat{y}_k)$
- Evaluation durch Eingabe von echten Messungen  $y_k$
- Identifikationsansätze:
  1. Korrelationsanalyse
  2. Instrumentvariablen-Schätzung
  3. Sub-Space Identifikation

# Signal Rekonstruktion – 1. Korrelationsanalyse

- Lineares zeit-invariantes System kann mit Impulsantwort  $g(k)$  beschrieben werden:

$$y(t) = \sum_{k=0}^{\infty} g(k) u(t - k)$$

- Ansatz: Mithilfe der Kreuzkorrelation von Ein- und Ausgabe die Gewichtsfunktion  $g(k)$  bestimmen
- Annahme: Eingabe  $u(t)$  ist unkorreliert mit Störsignalen, Mittelwertfrei und idealerweise weißes Rauschen

- Dann gilt:

$$R_{yu}(\tau) = \sum_{k=0}^{\infty} g(k) R_{uu}(\tau - k)$$

- Im Fall von weißem Rauschen vereinfacht sich die Gleichung zu

$$R_{yu}(\tau) = g(k) R_{uu}(0)$$



- Für eine endliche Anzahl an Eingaben  $N$  wird nun approximiert:

- $R'_{yu}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-\tau} u(t + \tau) y(t) , \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

- $R'_{uu}(\tau) = \frac{1}{N-\tau} \sum_{t=1}^{N-\tau} u(t + \tau) u(t), \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

- Mit folgendem Gleichungssystem:

- $$\begin{pmatrix} R'_{yu}(0) \\ \vdots \\ R'_{yu}(N-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R'_{uu}(0) & \cdots & R'_{uu}(N-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R'_{uu}(N-1) & \cdots & R'_{uu}(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g(0) \\ \vdots \\ g(N-1) \end{pmatrix}$$

lässt sich ein  $g(t)$ , N-ter Ordnung ermitteln

- Pre-Whitening Filter erforderlich
- Verwendete Eingaben müssen das Verhalten des Systems repräsentieren
- Hohe Ordnung und damit hohe Komplexität benötigt

- „**S**implified **R**efined **I**nstrumental **V**ariable method for **C**ontinuous-time **S**ystems“
- Annahme: Lineares, zeit-invariantes System
- System beschreibbar als Differentialgleichung
  - $y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \dots + a_n y^{(0)}(t) = b_0 u^{(m)}(t) + b_1 u^{(m-1)}(t) + \dots + b_m u^{(0)}(t)$
  - Sei  $s$  der Differentialoperator so lässt sich das System beschreiben:

$$y(t) = \frac{B(s)}{A(s)} u(t)$$

$$\text{mit } A(s) = s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n$$

$$B(s) = b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m$$

- Fehlerfunktion:  $\varepsilon(t) = y(t) - \frac{B(s)}{A(s)} u(t)$
- Umgeformt:  $\varepsilon(t) = \frac{1}{A(s)} [A(s)y(t) - B(s)u(t)]$
- Idee:  $F(s) = \frac{1}{A(s)}$  als Filter initialisieren und iterativ das Modell trainieren

# Signal Rekonstruktion – 2. SRIVC Method

- Fehlerfunktion:  $\varepsilon(t) = F [A(s)y(t) - B(s)u(t)]$
- Da Linear:  $\varepsilon(t) = A(s) y_f(t) - B(s)u_f(t)$ 
  - Bzw.  $\varepsilon(t) = y_f^{(n)}(t) + \dots + a_n y^{(0)}(t) - b_0 u_f^{(m)}(t) - \dots - b_m u^{(0)}(t)$
  - Wobei  $y_f^{(i)} = f_i(t) * y(t)$  ,  $i = 0, \dots, n$
  - Mit  $f_i(t) = L^{-1}(\frac{s^i}{A(s)})$

$$\text{➤ } y_f^{(n)}(t) = \begin{bmatrix} -y_f^{(n-1)}(t) \dots - y_f^{(0)}(t) & u_f^{(m)}(t) \dots u_f^{(0)}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_n \\ b_0 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} + \varepsilon(t)$$

- Instrumentvariable:  $\begin{bmatrix} -y_f^{(n-1)}(t) \dots - y_f^{(0)}(t) & u_f^{(m)}(t) \dots u_f^{(0)}(t) \end{bmatrix}$
- $\frac{1}{A(s)}$  muss bekannt sein bzw. geschätzt werden
- Modellordnung muss vorab geschätzt werden
- Kann zu Konvergenzproblemen führen

# Signal Rekonstruktion – 3. State Space

- **N4SID** – „Numerical Algorithm for State Space Subspace System Identification”
- System im Zustandsraum:
  - $x_{k+1} = A x_k + B u_k$
  - $y_k = C x_k + D u_k$
- Idee: Ordnung  $n$  und Parametrisierung des Systems aus Unterräumen von Ein/Ausgabe schätzen
- Sei:
  - $X_p = (x_0, \dots, x_{j-1}) \in R^{n \times j}$  Zustandssequenz der Vergangenheit
  - $X_f = (x_i, \dots, x_{i+j-1}) \in R^{n \times j}$  Zustandssequenz der Zukunft
  - $U_p = \begin{pmatrix} u_0 & \cdots & u_{j-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{i-1} & \cdots & u_{i+j-2} \end{pmatrix}$  die Hankel-Matrix vergangener Eingaben
  - $U_f = \begin{pmatrix} u_i & \cdots & u_{2i+j-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{2i-1} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{pmatrix}$  die Hankel-Matrix der zukünftigen Eingaben
  - Für Ausgaben  $Y_p, Y_f$  analog

# Signal Rekonstruktion – 3. State Space

- Erweiterte Beobachtungsmatrix:

$$\Gamma_i = (C \quad CA \quad CA^2 \quad \dots \quad CA^{i-1})^T$$

- $O_i = Y_{f/U_f} (U_p \quad Y_p)^T$

- Schiefe Projektion der Zukunfts-Ausgabe  $Y_f$  entlang des Zeilenraums der Zukunftseingabe  $U_f$  in den Zeilenraum der vergangenen Ein/Ausgaben  $U_p, Y_p$
- Wobei gilt:  $O_i = \Gamma_i X_f$

- Aus Singulärwertzerlegung von  $O_i$  kann nun:
  - Systemordnung  $n$  bestimmt werden
  - Die erweiterte Beobachtungsmatrix  $\Gamma_i$  geschätzt werden
- Mit bekannten  $\Gamma_i, O_i$  können nun  $X_f$  sowie  $A$  und  $C$  bestimmt werden
- $B, D$  durch lineares Regressionsverfahren

- Kombination 3 neuer Ansätze
  1. Eindimensionale Messvariable  $B_x$
  2. Neue Sensorposition mit glattem sinusoidem Signal
  3. Transformation des gemessenen Signals vor Eingabe in den Kalman Filter mit identifiziertem System  $g$

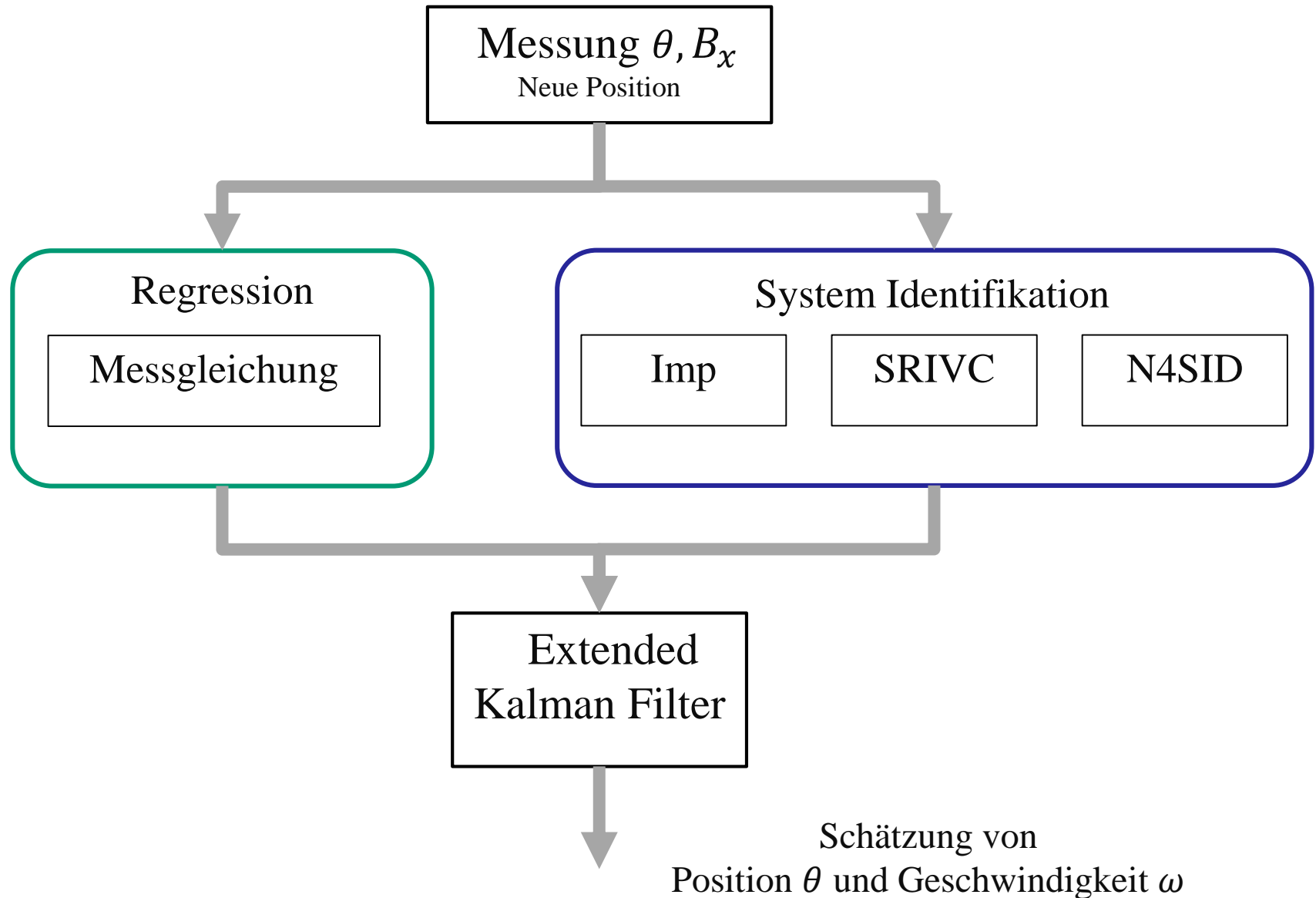


Vereinfachung der Messgleichung  $f$

- Eindimensionale Abbildung
- Geschwindigkeitsunabhängig
- Beschreibbar als einfacher sinusoider Term

$$\begin{aligned} &\text{Messgleichung} \\ &f: \text{Rotorwinkel} \rightarrow \text{Magnetfeldstärke} \\ &\theta \rightarrow B_x \end{aligned}$$

# Schätzmodell - Training



# Auswertung - Schätzfehler

## Positive Rotation

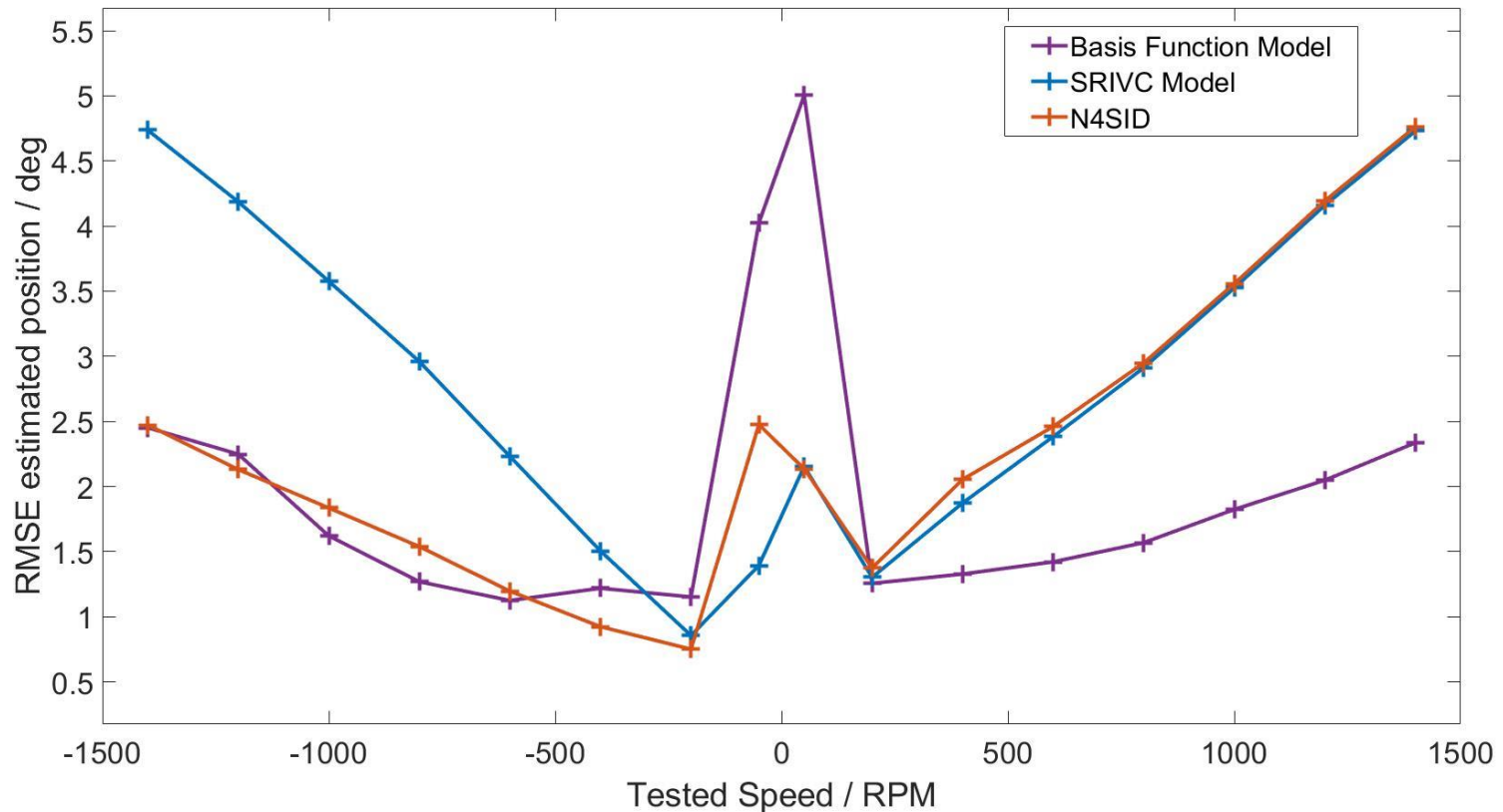
System	RMSE( $\theta$ ) / deg	RMSE( $\omega$ ) / RPM
Imp	121.1584	49.6462
SRIVC	2.8800	5.1206
N4SID	2.9678	4.9448

## Negative Rotation

System	RMSE( $\theta$ ) / deg	RMSE( $\omega$ ) / RPM
Imp	120.2361	52.7653
SRIVC	2.6809	3.5901
N4SID	1.6657	3.5546

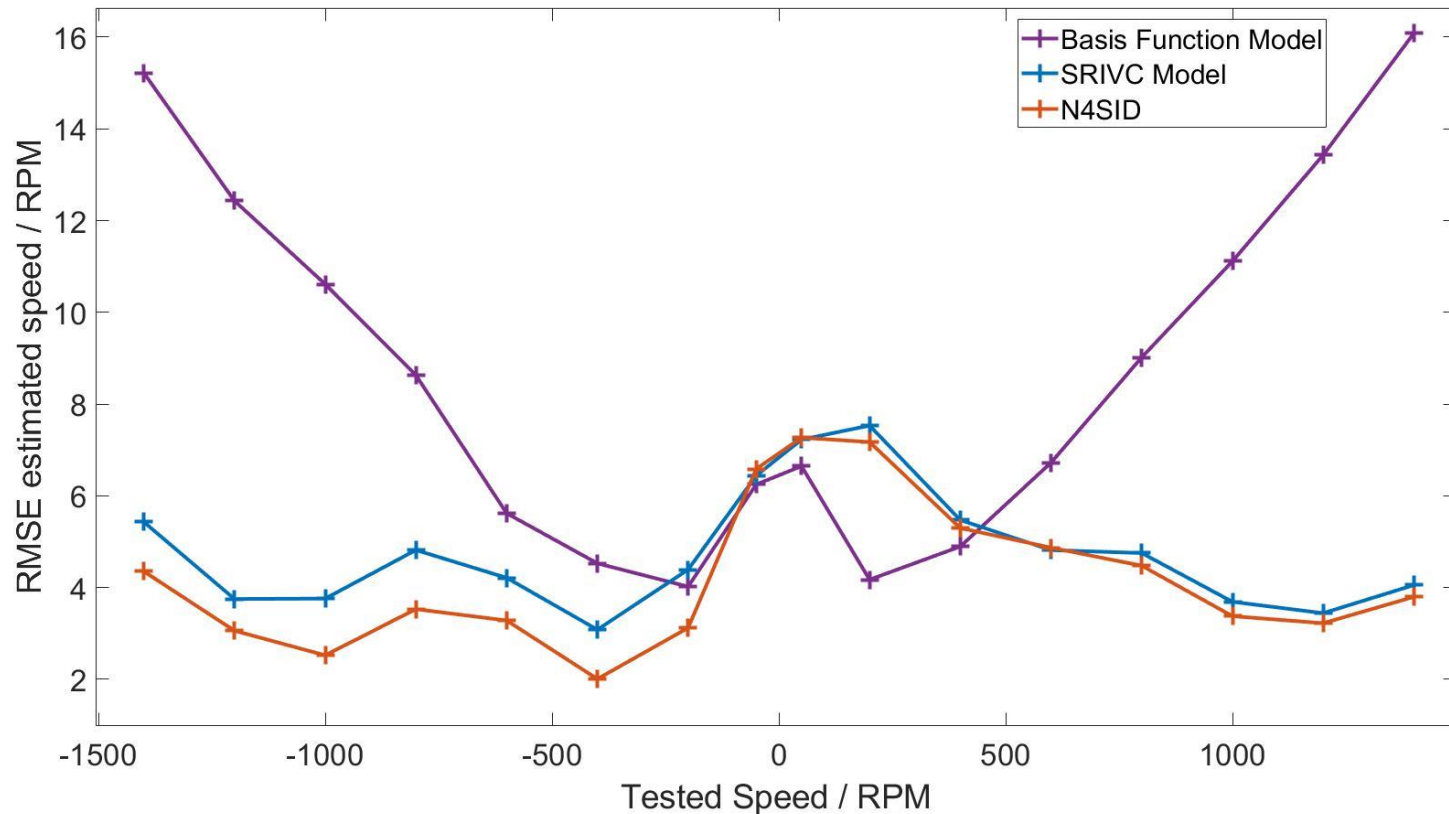


# Auswertung – Position Schätzfehler



- Basisfunktion sensibel gegenüber Rauschen
- SRIVC steigender Fehler bei hohen Geschwindigkeiten
- N4SID starke Abweichung zwischen Rotationsrichtungen

# Auswertung – Geschw. Schätzfehler



- Basisfunktion hat Probleme bei steigenden Geschwindigkeiten
- SRIVC und N4SID relativ konstant über alle Geschwindigkeiten
- Leicht erhöhte Fehler bei niedrigen Geschwindigkeiten

# Auswertung – Rechenzeit

- Komplexität der System bestimmt durch Modellordnung

		Imp	SRIVC	N4SID
Modellordnung	Positiv	15	3	3
	Negativ	11	2	2

- Rechenzeit pro Schätziteration als Indikator für Komplexität des Schätzmodells

	Imp	SRIVC	N4SID	Basis Function
Rechenzeit pro Schätzung / ms	0.0689	0.0679	0.0662	0.3229

- Signifikante Reduzierung der Rechenzeit zu vorherigen Arbeiten
- Komplexität der Systeme wenig Einfluss auf Rechenzeit

- Zwei wesentliche Probleme des Schätzmodells eliminiert
  - Neue Sensorposition mit purem Signal der Permanentmagneten ohne Störung durch Magnetfeldern in den Spulen
  - Effiziente Technik entwickelt um ungewollte Tiefpasstransformationen mithilfe eines weiteren Systems zu invertieren
- Erfolgreich die Dimension der Messvariable reduziert
- Integrierung der neuen Ansätze in das Modell mit präzisen Schätzergebnissen
  - $RMSE(\theta)_{N4SID} = 2,3168 \text{ deg}$
  - $RMSE(\omega)_{N4SID} = 4,2435 \text{ RPM}$
- Signifikante Rechenzeitreduktion von  $0,2567 \text{ ms}$  zu vorherigen Arbeiten bei gesteigerter Schätzpräzision

- Rotation des Sensors ermöglichen für besser Messpositionen
- Erhöhung der Systemkomplexitäten für präzisere Ergebnisse und weniger Overhead
- Das Schätzmodell unter Last evaluieren

Thank you for your attention

