

# ERWEITERUNG DER REGELUNG EINES WINDKRAFTGENERATORS UM EINE METHODE ZUR ERFASSUNG VON AXIALEN SCHWINGUNGEN

Zwischenpräsentation von Ping He

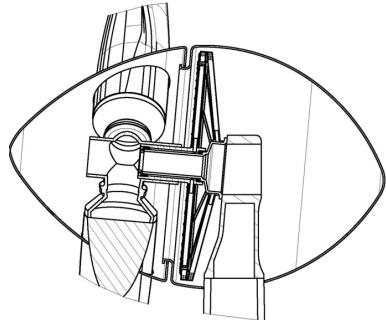
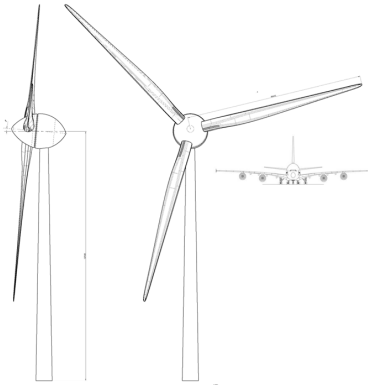
28.09.2021

# Übersicht

- 1 Hintergrund
- 2 Motivation
- 3 Grundlagen
- 4 Ergebnis von Simulink
- 5 Verifizierungsphase
- 6 Abschluss

# Hintergrund

Bei Windkraftanlagen geht der Trend eindeutig zu größeren Leistungen der Einzelanlagen; Das Fraunhofer IEE treibt die Weiterentwicklung von Windkraftanlagen in der Multi-MW Klasse mit innovativen Lösungen voran.

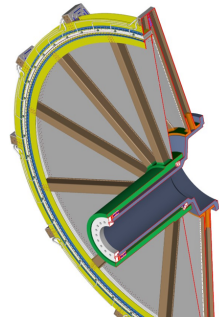


# Magnetring-Demonstrationsgenerator

Innerhalb des Forschungsprojektes Magnetring wird unter anderem eine Gewichtsreduktion, durch den Einsatz von hoch segmentierten permanenterregten Synchrongeneratoren (PMSG) in Leichtbauweise, erreicht.

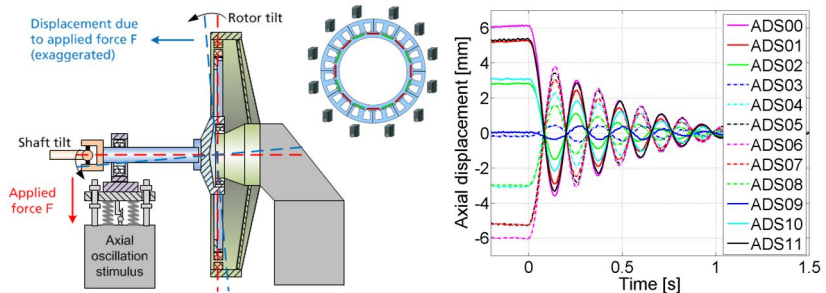
## Auslegung Demonstrationsgenerator

- Zahl der Segmente: 12
- Bemessungsspannung: 400 V
- Bemessungsleistung: 180 kW
- Bemessungsstrom: 427,2 A
- Bemessungsdrehzahl: 50 1/min
- Bemessungsdrehmoment: 33,9 kNm
- Mechanischer Luftspalt: 5 mm
- Magnethöhe: 15 mm



# Auslenkung des Rotors und hervorgerufene axiale Schwingungen

Durch den scheibenförmigen Aufbau des PMSG sind im späteren Betrieb axiale Schwingungen zu erwarten.

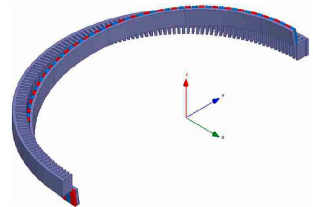


# Motivation

Es sollen alternative Möglichkeiten(Sensorlos) zur Erfassung von axialen Schwingungen untersucht werden. Weil Abstandssensoren mit zusätzlichen Kosten und einer erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit verbunden.

## Parameterschätzung der Flussverkettung $\Psi_f$

- Model Reference Adaptive System(MRAS)
- Recursive Least Squares Method(RLS)
- Extended Kalman Filter(EKF)
- Luenberger Beobachter(LB)



# Strang-Ersatzschaltbild des PMSMs

Das symmetrische elektrische Dreiphasensystem der PMSM kann durch ein einsträngiges Ersatzschaltbild dargestellt werden.

Somit lassen sich die Differentialgleichungen

$$U_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d - \omega \psi_q$$

$$U_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q + \omega \psi_d$$

Die Flussverkettungen in der d-q-Achse

$$\psi_d = L_q i_q$$

$$\psi_q = L_d i_d + \Psi_f$$

Die Differentialgleichungen des PMSMs liegt:

$$U_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d - \omega L_q i_q$$

$$U_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q + \omega (L_d i_d + \Psi_f)$$

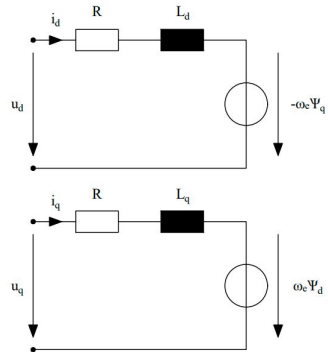


Bild 2.3: Ersatzschaltbilder der dq-Komponenten

# Model Reference Adaptive System(MRAS)

Dieser Mechanismus basiert darauf, dass wir ein Referenzmodell haben(identifizierte System) und zweites Modell, das von den identifizierten Parametern abhängig ist.

Das Ziel der Identifikation ist es, die Ausgaben zu Fehler des Modells gleich Null  
 $\rightarrow e = y_r - y_i = 0$

Dieser Fehler des identifizierten Modells geht weiter in eine adaptiver Mechanismus, dessen Output bereits identifiziert.

Diese Methode ist iterativ bis die Fehler bis Null.  
 Normalerweise benutzt man einen Pi-Regler

$$\rightarrow F_{PI}(s) = K + \frac{1}{T_i \cdot s}$$

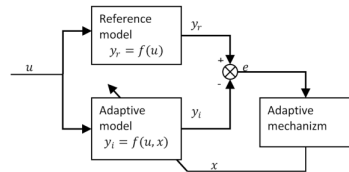


Figure 4 Identification structure MRAS



# Parameterschätzung der Flussverkettung durch MRAS

Umformen der Spannungsdifferentialgleichungen des PMSMs :

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(U_q - R_s \cdot i_q - \omega \cdot L_d \cdot i_d - \omega \cdot \Psi_f)$$

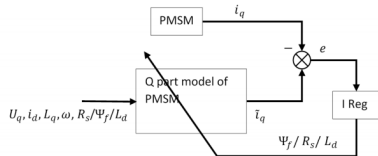


Figure 5 Identification structure MRAS

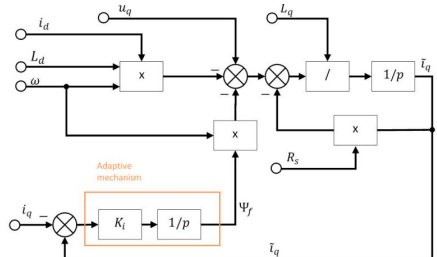


Figure 6 MRAS identification structure for  $\Psi_f$

# Recursive Least Squares Method(RLS)

Durch ein lineares Modell mit den zu schätzenden Parametern  $\hat{\theta}$  kann Ein- und Ausgangsdaten  $Y = X \cdot \hat{\theta}$  verbunden werden.

$$U_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q + \omega (L_d i_d + \Psi_f)$$

$$\xrightarrow{L_q=L_d=L_s} \frac{di_q}{dt} + \omega \cdot i_d = -\frac{R_s}{L_s} \cdot i_q - \frac{\Psi_f}{L_s} \cdot \omega + \frac{U_q}{L_s}$$

$$\omega \cdot i_d = \begin{bmatrix} -i_q & -\omega & U_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_s} \\ \frac{\Psi_f}{L_s} \\ \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}$$

$$\text{Messbare Eingangsdaten } X = \begin{bmatrix} -i_q & -\omega & U_q \end{bmatrix} \text{ eingeschätzte Parameters } \hat{\theta} = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L_s} \\ \frac{\Psi_f}{L_s} \\ \frac{1}{L_s} \end{bmatrix}$$

# RLS-Algorithmus

Die Formel für RLS erhält man wie folgt, wobei  $m$  Rekursionsschritt ist.

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma(m+1) = \frac{P_m X(m+1)}{\lambda + \mathbf{X}(\mathbf{m}+1)^\top P_m X(m+1)} \\ \theta(m+1) = \theta(m) + \gamma(m+1) \cdot (Y(m+1) - \mathbf{X}(\mathbf{m}+1)^\top \theta(m)) \\ P(m+1) = \frac{1}{\lambda} \cdot (P(m) - \gamma(m+1) \mathbf{X}(\mathbf{m}+1)^\top P(m)) \end{array} \right.$$

$\lambda$ : Vergessensfaktor  $\rightarrow$  die historischen Messdaten verlieren und die aktuellen Daten stärker gewichten (im Bereich  $0.95 < \lambda < 1$ )

# Extended Kalman Filter(EKF)

Ein mathematisches Verfahren zur iterativen Schätzung von Parametern zur Beschreibung von Systemzuständen auf der Basis von fehlerbehafteten Beobachtungen.

Die Systemzustandsraummodell und seine diskreten Messungen sind wie folgt beschrieben:

$$\begin{cases} \dot{x} = f[x(t)] + Bu(t) + \sigma(t) \\ y(t_k) = h(t_k) + \mu(t_k) \end{cases}$$

wobei  $\sigma(t)$  und  $\mu(t_k)$  mittleres weißes Gaußsches Rauschen mit Kovarianz  $Q(t)$  bzw.  $R(t_k)$  sind.  $u(t)$  ist der Eingangsvektor.

# Variation der PMSM-Flussverkettung

Um die Flussverkettung einzuschätzen, wird die als eine Zustandsvariable gewählt. Da die Flussverkettung kann sich nicht stark ändern, seine Ableitung wird auf Null gesetzt.

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} \cdot i_d + \frac{\omega L_q}{L_d} \cdot i_q + \frac{U_d}{L_d} + \frac{\omega}{L_d} \cdot \psi_{rq} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} \cdot i_q - \frac{\omega L_d}{L_q} \cdot i_d + \frac{U_q}{L_q} - \frac{\omega}{L_q} \cdot \psi_{rd} \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} = 0 \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} = 0 \end{cases}$$

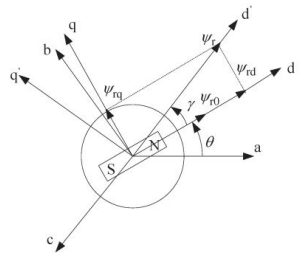


Fig. 4. Variation of IPMSM PM flux linkage.

# Kalman-Filter vierter Ordnung

$$\dot{x} = f[x(t)] + Bu(t) + \sigma(t)$$

$$f[x(t)] = \begin{bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ f(3) \\ f(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} \cdot i_d + \frac{\omega L_q}{L_d} \cdot i_q + \frac{\omega}{L_d} \cdot \psi_{rq} \\ -\frac{R_s}{L_q} \cdot i_q - \frac{\omega L_d}{L_q} \cdot i_d - \frac{\omega}{L_q} \cdot \psi_{rd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$y(t_k) = h(t_k) + \mu(t_k)$$

$$h(t_k) = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

$$\text{Zustandsgröße } x = \begin{bmatrix} i_d & i_q & \psi_{rd} & \psi_{rq} \end{bmatrix}^T$$

$$\text{Eingangsgröße } u = \begin{bmatrix} U_d & U_q \end{bmatrix}^T$$

# Die Jacobi-Matrizen definieren

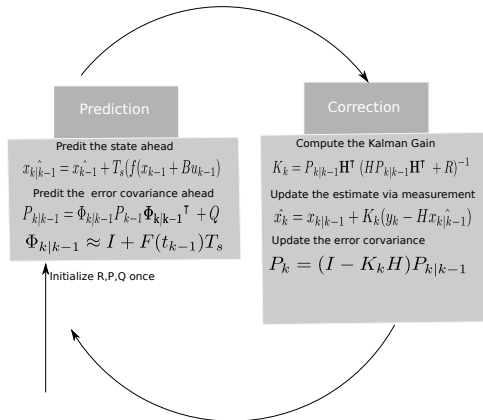
Jacobian Matrix: Partielle Ableitung nach den Zustandsgröße  $x$

$$F(x(t)) = \frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_{x=x(t)} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{\omega L_q}{L_d} & 0 & \frac{\omega}{L_d} \\ -\frac{\omega L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{\omega}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H(x(t)) = \frac{\partial h}{\partial x} \bigg|_{x=x(t)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

# Algorithmus des EKF's

Sowohl der optimale Zustand als auch seine Kovarianz  $P_{k|k}$  werden berechnet in einer zweistufigen Schleife





# Luenberger Beobachter(LB)

Ein Beobachter ist ein System, das aus bekannten Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen eines beobachteten Referenzsystems nicht messbare Größen (Zustände) rekonstruiert. Dazu bildet er das beobachtete Referenzsystem als Modell nach und führt mit einem Regler die messbaren und deshalb mit dem Referenzsystem vergleichbaren.

Der Zustandsbeobachter ist gegeben durch

$$\dot{\hat{x}} = Ax + Bu + K(y - \hat{y})$$

$$\hat{y} = C\hat{x}$$

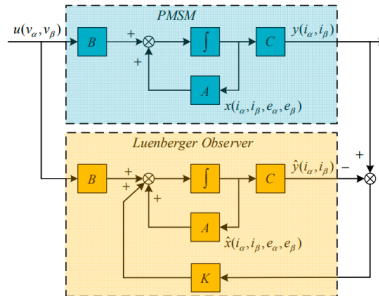


Fig. 2. Luenberger state observer

# Luenberger Beobachter vierter Ordnung

Die Spannungsgleichung auf der  $\alpha$ - $\beta$ -Koordinate kann beschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt} L_q & 0 \\ 0 & R_s + \frac{d}{dt} L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad \text{wobei } e_\alpha = -\psi\omega \sin(\theta_e), \quad e_\beta = \psi\omega \cos(\theta_e)$$

$e_\alpha$  und  $e_\beta$  sind die Back-EMF auf der festen Koordinate. Die Back-EMF von PMSM kann nicht direkt gemessen werden und daher benutzt man einen Luenberger Beobachter.

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_\alpha - \frac{e_\alpha}{L_q} + \frac{U_\alpha}{L_q} \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_\beta - \frac{e_\beta}{L_q} + \frac{U_\beta}{L_q} \\ \frac{de_\alpha}{dt} = \omega e_\beta \\ \frac{de_\beta}{dt} = -\omega e_\alpha \end{cases}$$

$$\dot{\hat{x}} = Ax + Bu + K(y - \hat{y})$$

$$x = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_q} & 0 & -\frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} & 0 & -\frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 & 0 & \omega \\ 0 & 0 & -\omega & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} K1 & 0 \\ 0 & K1 \\ K2 & 0 \\ 0 & K2 \end{bmatrix}$$

## BSB zur Schätzung der Flussverkettung durch LB

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad \hat{y} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

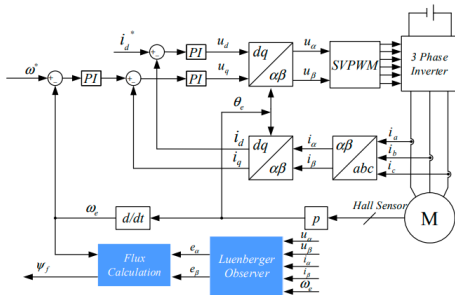
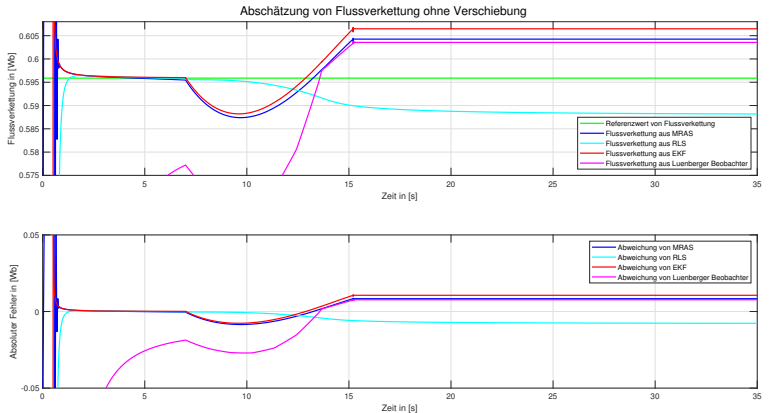
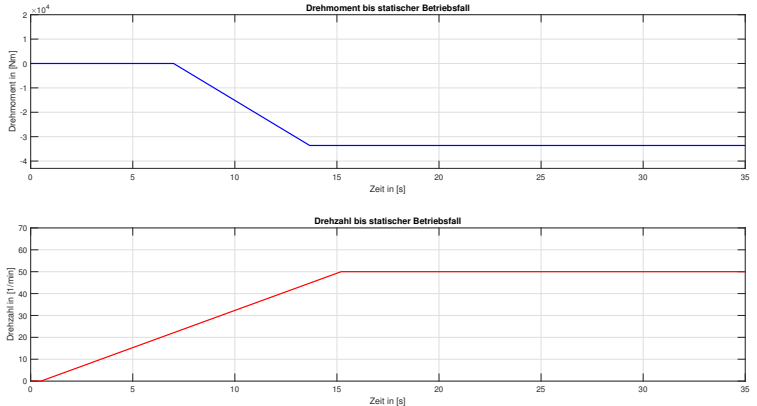


Fig. 3. The Control block diagram of PM flux linkage estimation of PMSM

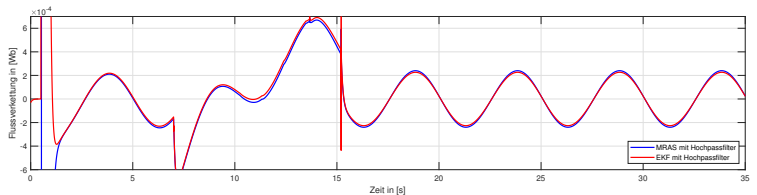
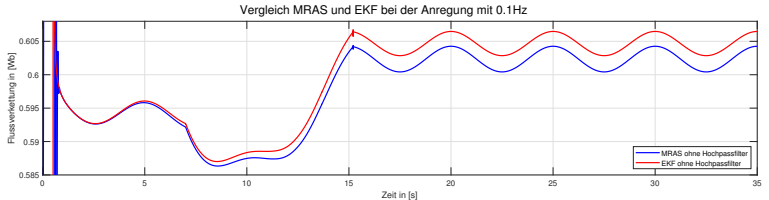
# Parameterschätzung $\psi_f$ ohne Verschiebung



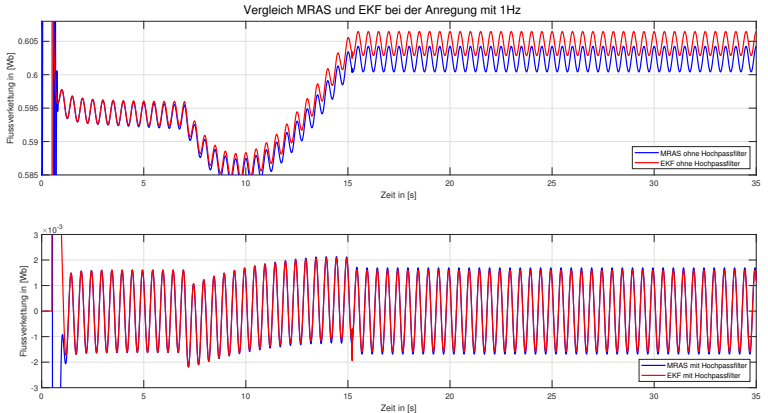
# Drehzahl und Drehmoment bis statischer Betriebsfall



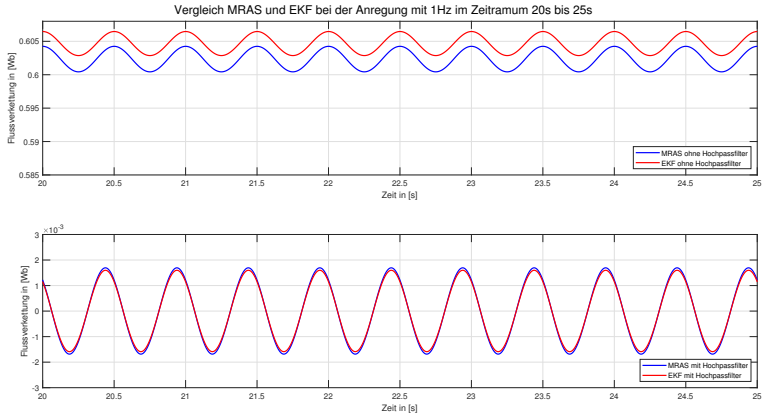
# Vergleich MRAS und EKF bei der Anregung mit 0.1Hz sinusförmiger Schwingung



# Vergleich MRAS und EKF bei der Anregung mit 1Hz sinusförmiger Schwingung

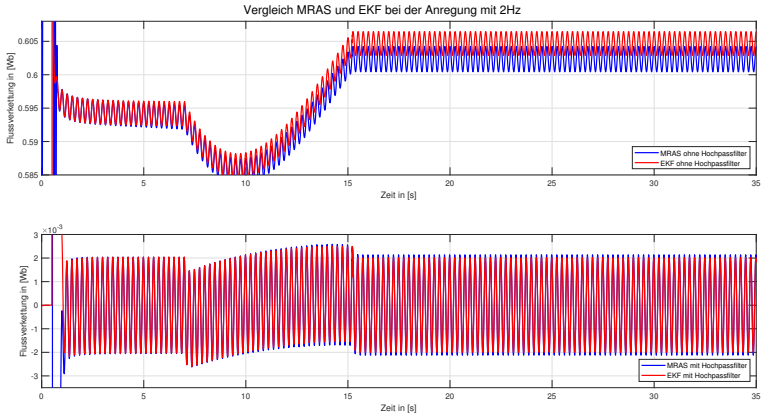


# Vergleich MRAS und EKF bei der Anregung mit 1Hz sinusförmiger Schwingung im Zeitraum 20s bis 25s

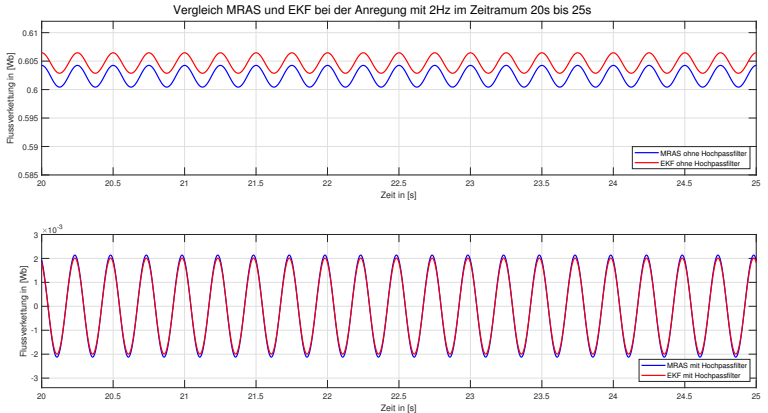




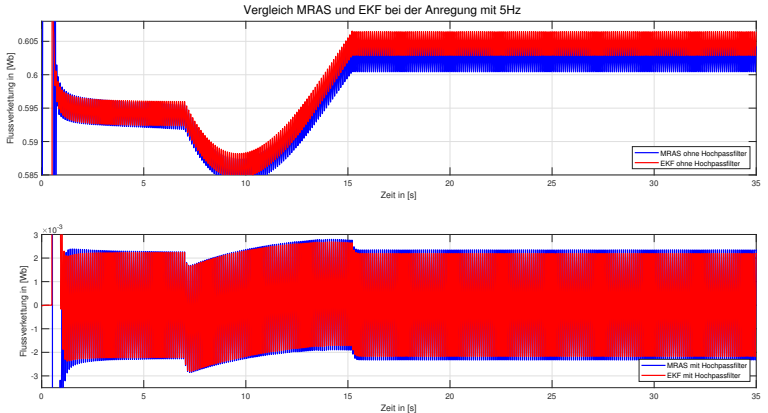
# Vergleich MRAS und EKF bei der Anregung mit 2Hz sinusförmiger Schwingung



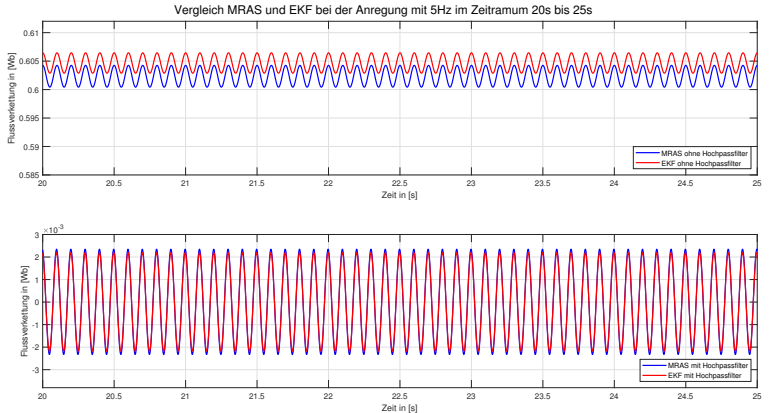
# Vergleich MRAS und EKF bei der Anregung mit 2Hz sinusförmiger Schwingung im Zeitraum 20s bis 25s



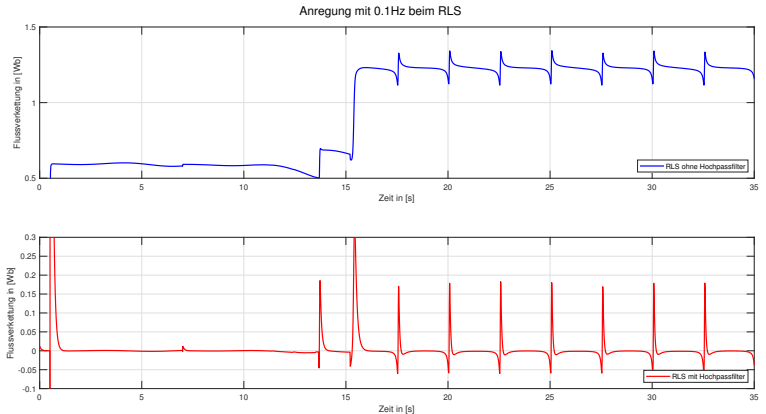
# Vergleich MRAS und EKF bei der Anregung mit 5Hz sinusförmiger Schwingung



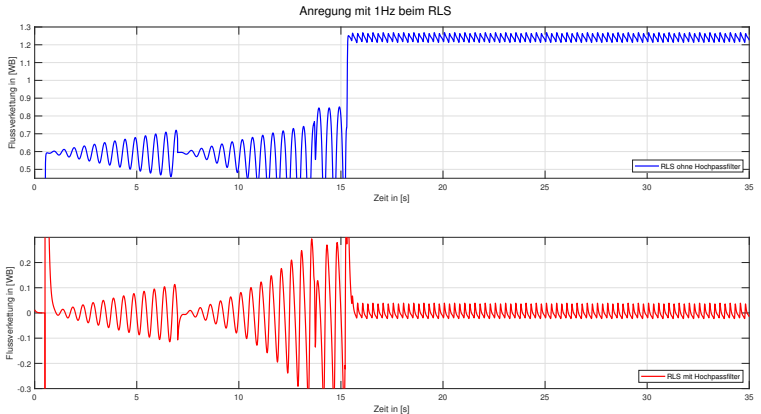
# Vergleich MRAS und EKF bei der Anregung mit 5Hz sinusförmiger Schwingung im Zeitraum 20s bis 25s



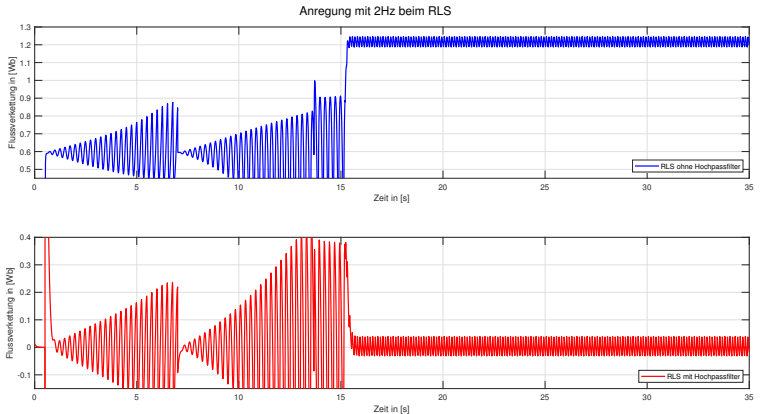
# Anregung mit 0.1Hz sinusförmige Schwingung beim RLS



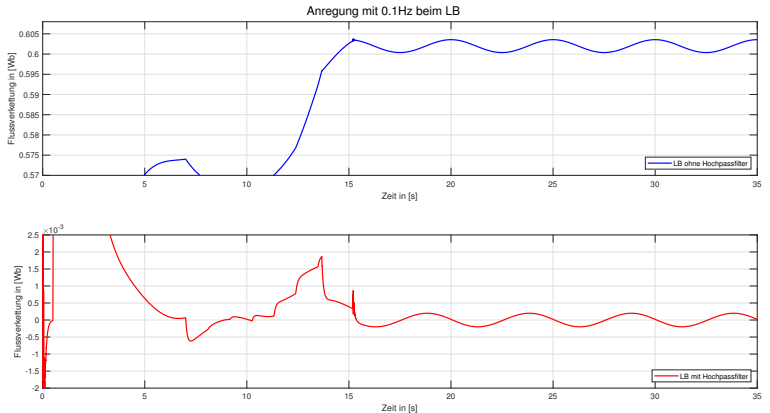
# Anregung mit 1Hz sinusförmige Schwingung beim RLS



# Anregung mit 2Hz sinusförmige Schwingung beim RLS

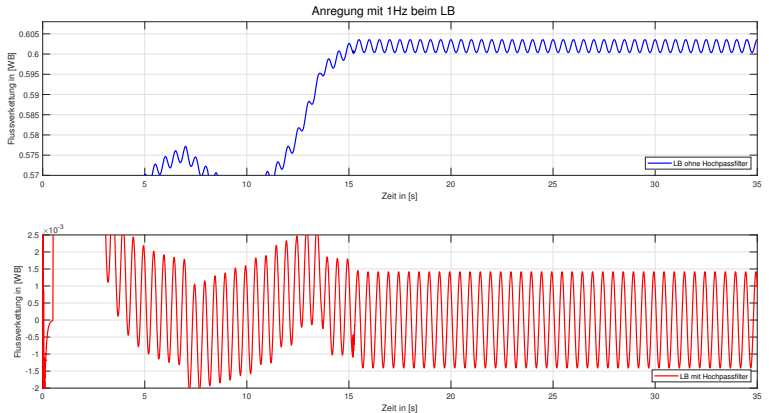


# Anregung mit 0.1Hz sinusförmige Schwingung beim LB

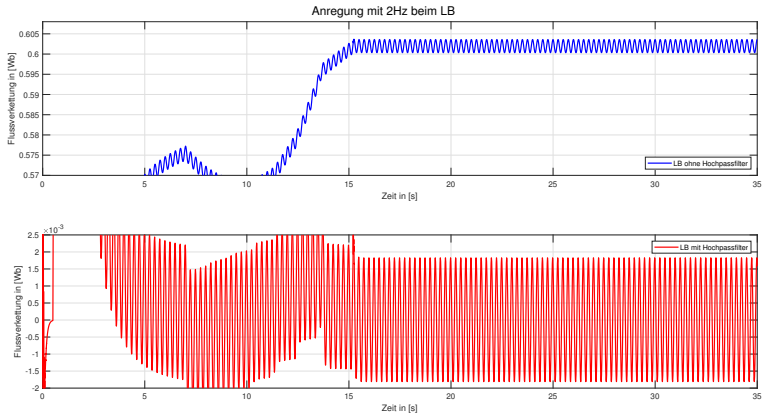




# Anregung mit 1Hz sinusförmige Schwingung beim LB



# Anregung mit 2Hz sinusförmige Schwingung beim LB

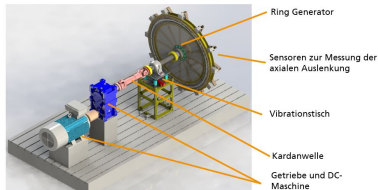


# Verifizierung der Methoden zur Parameterschätzung

Aus das Ergebnis von Simulation wird die Konzepte

- MRAS
- EKF

an einem Demonstrator innerhalb einer Laborumgebung verifizieren.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!