

Vergleich transienter Frequenzschätzverfahren zur Auswertung des Frequenzgradienten in aktiven Verteilnetzen

Anna Pfendler*, Rafael Steppan*, Jutta Hanson

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien (E5), Landgraf-Georg-Straße 4, 64283 Darmstadt, Deutschland, +49 6151 16 24663, anna.pfendler@e5.tu-darmstadt.de, www.e5.tu-darmstadt.de

Kurzfassung:

Im Verbundsystem sind die Frequenzregelung und -stabilität von entscheidender Bedeutung und ein Indikator für die systemweite Wirkleistungsbilanz. Durch die Abschaltung konventioneller Kraftwerke kommt es aufgrund der reduzierten Systemträgheit zu schnelleren Frequenzänderungen bzw. einem steileren Frequenzgradienten. Aus diesem Grund steigt die Bedeutung von Schätzverfahren der elektrischen Frequenz, unter anderem als Eingangsgröße zur Regelung von umrichterbasierten Erzeugungsanlagen. Ziel dieser Arbeit ist die Implementierung, der Vergleich und die Analyse der Robustheit verschiedener Frequenzschätzverfahren. In einer einfachen Testbench in Matlab/Simulink werden die Verfahren implementiert und die Parameter der Verfahren für einen Referenzfall optimiert. Dabei werden die Phasenregelschleife, das Zero-Crossing-Verfahren und das Rekursive Gauß-Newton-Verfahren als Echtzeit-Verfahren implementiert. Als Vergleichswert dient die Frequenz eines angeschlossenen Synchrongenerators. Mit der Generatorfrequenz als Vergleich werden von den genannten Verfahren Ergebnisse mit einer Abweichung von maximal 15 mHz erreicht. Das Zero-Crossing-Verfahren weist bei Änderung der Höhe des Lastsprungs die größte Robustheit auf. Zudem verhalten sich die sensitiven Parameter der Frequenzschätzverfahren annähernd linear zur Höhe des Lastsprungs, sodass eine Implementierung für Simulationen ausgelegt werden kann.

Keywords: Instantane Frequenz, Frequenzstabilität, aktive Verteilnetze, Frequenzschätzung

1 Einleitung

Im elektrischen Energiesystem ist die Regelung der Frequenz ein zentraler Faktor für die Wahrung der Systemstabilität [1]. Im Zuge der Energiewende steigt der Anteil von Erneuerbare-Energien-Anlagen (EEA) im elektrischen Energiesystem. Diese sind häufig über Umrichter an das Netz angeschlossen und ersetzen konventionelle, über Synchrongeneratoren angeschlossene Kraftwerke. Dadurch sinkt die mechanische Trägheit im System, die zur Stabilisierung der Netzfrequenz beiträgt. Als Folge davon können Störungen im System zu stärkeren Frequenzänderungen bzw. zu einem steileren Frequenzgradienten führen [2]. Insbesondere im Hinblick auf einen zellularen Ansatz mit verstärkt dezentralen Strukturen, erlangt die Messung bzw. Schätzung der Frequenz im Verteilnetz immer größere Relevanz. Zu den Anwendungen zählt die Messung der Frequenz als Eingangsgröße für die Regelung von umrichterbasierten Erzeugungsanlagen [2].

Infolge eines Kraftwerksausfalls (Wirkleistungsungleichgewicht) sinkt die Netzfrequenz. Nach einer instantanen Trägheitsreaktion greift die Frequenzregelung, die den Frequenzeinbruch durch zusätzliche Wirkleistungseinspeisung abfängt und die Frequenz zurück zum Sollwert führt [2]. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der instantanen Frequenz im Kurzzeitbereich von wenigen Sekunden nach dem Ausfall eines Kraftwerks (bzw. äquivalent dazu dem Sprung der Netzlast).

Im Gegensatz zur mechanischen Rotation von Maschinen lässt sich die elektrische Frequenz nicht direkt messen. Die Frequenz lässt sich jedoch durch die Messung einer elektrischen Wechselgröße, wie der dreiphasigen Netzspannung ableiten. Im transienten Bereich verläuft diese elektrische Spannung nicht mehr rein sinusförmig, sodass die instantane Frequenz durch Schätzverfahren ermittelt werden kann [3].

In Kapitel 2 werden zunächst die Frequenzstabilität und die Frequenzregelung des Energiesystems erläutert und der Begriff der instantanen Frequenz definiert. Darauf folgen die Vorstellung der verschiedenen Frequenzschätzverfahren und die Erläuterung der mathematischen Zusammenhänge, die diesen zugrunde liegen. Diese Verfahren sind:

- Phasenregelschleife,
- Zero-Crossing-Verfahren und
- Rekursives Gauß-Newton-Verfahren.

In Kapitel 3 folgt die Implementierung der Verfahren in eine Testbench. Die Auswertung und der Vergleich der Verfahren für einen speziellen Referenzfall erfolgt in Kapitel 4. Im Anschluss wird in Kapitel 5 durch eine Sensitivitätsanalyse die Robustheit der Verfahren verglichen. Zum Schluss wird in Kapitel 6 die Arbeit zusammengefasst und ein Fazit der Ergebnisse gezogen.

2 Elektrische Frequenz

Dieses Kapitel beschreibt die theoretischen Grundlagen zur elektrischen Frequenz und deren Messung bzw. Schätzung. Zunächst wird der Begriff der Instantanen Frequenz definiert. Anknüpfend daran wird die Frequenzstabilität und die Bedeutung der Frequenz für ein stabiles System erläutert. Abschließend werden drei Frequenzschätzverfahren vorgestellt, mit deren Hilfe die elektrische Frequenz aus einer Wechselspannung geschätzt werden kann.

2.1 Definition der Instantanen Frequenz

Sowohl in der Natur als auch in der Signalverarbeitung treten dynamische Fälle auf, bei denen sich die Frequenz über die Zeit ändert. In dieser Arbeit wird die sich ändernde Frequenz der Wechselspannung im Energiesystem betrachtet [3]. Somit entsteht das Problem der Beschreibung einer Instantanen Frequenz, die in [3] als Generalisierung der Definition der konstanten Frequenz beschrieben wird: Die Änderungsrate des Phasenwinkels pro Zeiteinheit. Zum gleichen Ergebnis kommt das Vorgehen, bei dem das Signal einer harmonischen Schwingung definiert wird als

$$s(t) = A \cdot \cos \left[\int_0^t 2\pi f(t) dt + \phi \right] \quad \text{mit} \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

mit der Amplitude A , der Frequenz f und der konstanten Phase ϕ . Aus dem Argument der Kosinusfunktion wird die Instantane Frequenz definiert zu

$$f_{\text{inst}}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad \text{mit} \quad \Phi(t) = \omega t - \phi.$$

2.2 Frequenz im Energiesystem

Infolge einer Störung im Energiesystem, z.B. dem Ausfall einer Erzeugungseinheit, kommt es zu einem Ungleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Wirkleistung und die Netzfrequenz ändert sich. Wird mehr Wirkleistung erzeugt als verbraucht, so beschleunigen die Generatoren und die Frequenz steigt. Im umgekehrten Fall sinkt die Frequenz. Diese Arbeit untersucht Szenarien, in denen infolge einer Störung mehr Wirkleistung verbraucht wird als erzeugt wird und damit die Frequenz sinkt.

Der typische Frequenzverlauf nach einer Störung kann in mehrere Abschnitte unterteilt werden und ist in Abbildung 1 dargestellt. Im transienten Zeitbereich, in den ersten Sekunden nach dem Ausfall der Erzeugungseinheit, sinkt die Netzfrequenz, denn das Ungleichgewicht wird durch die in den Schwungmassen der Generatoren gespeicherte kinetische Energie kompensiert (initiale Trägheitsreaktion). Als Folge davon werden diese durch die erhöhte Last abgebremst und rotieren mit verringerter Geschwindigkeit – die Netzfrequenz sinkt. Wie stark die einzelnen Generatoren abgebremst werden hängt von deren Trägheit und elektrischen Entfernung zur Störung ab. Durch die initiale Trägheitsreaktion wird auch der Frequenzgradient (engl. Rate of Change of Frequency, RoCoF) bestimmt. [4]

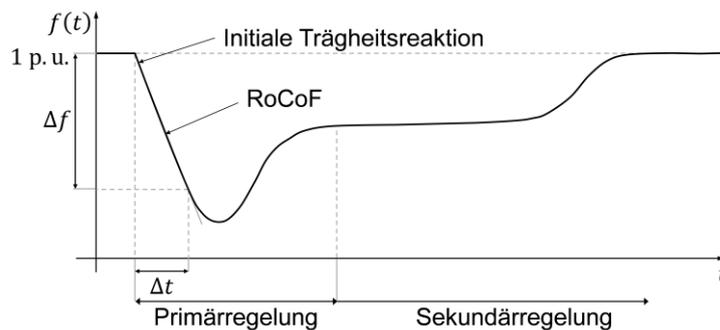


Abbildung 1: Typischer Frequenzverlauf nach dem Ausfall einer Erzeugungseinheit, angelehnt an [5]

Sobald eine Frequenzabweichung $|\Delta f| > 10$ mHz auftritt, wird die Primärregelung aktiv und wirkt durch die Anpassung der eingespeisten Wirkleistung in einem Bereich von $\pm 5\%$ der Bemessungsleistung der Frequenzabweichung entgegen [13]. Die Primärregelung führt die Frequenz auf einen neuen stationären Wert, der jedoch von dem Vorfehlerzustand abweicht. Durch die Sekundärregelung wird das Defizit an erzeugter Energie von den Kraftwerken des Bilanzkreises ausgeglichen und die Frequenz auf den Nennwert zurückgeführt. Mit der Tertiärregelung wird sichergestellt, dass bei einem erneuten Fehlerfall genügend Regelenergie zur Verfügung steht [4].

2.3 Frequenzschätzverfahren

Durch den steigenden Anteil von EEA im Netz wird die Frequenzmessung bzw. -schätzung immer wichtiger, denn für diese Anlagen wird die Frequenz als Eingang der Regelung benötigt [2]. Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, ist die Frequenz eine abgeleitete Größe, die nur indirekt gemessen werden kann. Dies geschieht über die Messung der Spannung, da diese im Vergleich zum elektrischen Strom die stetigere und ausschlaggebendere Größe ist. In

diesem Abschnitt werden drei echtzeitfähige Frequenzschätzverfahren vorgestellt. Das Ziel ist es, mit Hilfe dieser Verfahren die Frequenz des elektrischen Netzes aus einer gemessenen Wechselspannung zu bestimmen.

2.3.1 Phasenregelschleife

Eine Phasenregelschleife (engl. Phase-Locked Loop, PLL) ist ein geschlossener Regelkreis, dessen Ausgangssignal $\hat{\Phi}$ mit dem Eingangssignal v_{abc} sowohl in Phase, als auch in der Frequenz synchronisiert wird [6]. Durch den steigenden Anteil an EEA werden PLL immer häufiger im elektrischen Netz eingesetzt. Ihre Hauptaufgabe ist es, die Umrichter mit dem Netz zu synchronisieren. Ein Nebenprodukt von diesen Regelkreisen ist, dass damit auch die Frequenzänderung geschätzt werden kann [7]. Die Grundstruktur einer PLL besteht aus drei Blöcken: dem Phasendetektor, dem Schleifenfilter und dem spannungsgesteuerten Oszillator (engl. Voltage Controlled Oscillator, VCO). Als Eingangssignal wird die dreiphasige Spannung verwendet und das Ausgangssignal ist der geschätzte Phasenwinkel $\hat{\Phi}$. Ein Zwischenergebnis des Regelkreises, der Ausgang des Schleifenfilters $\hat{\omega}$, ist der geschätzte Wert für die Frequenz an dieser Stelle im elektrischen Netz [8]. Durch die Verwendung einer Steigungsbegrenzung und eines Tiefpassfilters kann die Frequenzschätzung verbessert werden. In Abbildung 2 ist die beschriebene Struktur einer PLL zur Frequenzschätzung dargestellt.

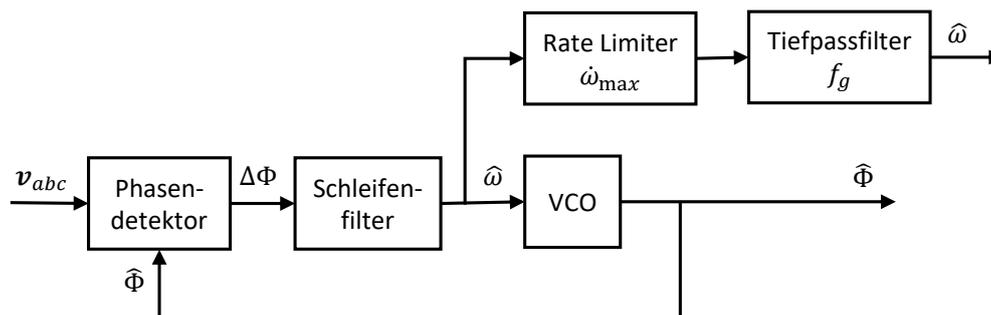


Abbildung 2: Grundstruktur einer PLL mit Erweiterung durch Steigungsbegrenzung und Tiefpassfilter, angelehnt an [8]

2.3.2 Zero-Crossing-Verfahren

Das Zero-Crossing-Verfahren (ZC) funktioniert nach dem Prinzip, dass die Nulldurchgänge des Eingangssignals gezählt werden und daraus der Wert für die Frequenz abgeleitet wird. Als Eingangssignal wird der sinusförmige Spannungsverlauf verwendet. Mit der konstanten Abtastfrequenz f_s und dem Abstand zwischen zwei Nulldurchgängen wird die Frequenz mit der Formel

$$\hat{f} = \frac{f_s}{2 \cdot (k_n^0 - k_{n-1}^0)} \quad (2.1)$$

geschätzt [9]. Dabei ist k_n^0 die diskrete Zeitposition des n -ten Nulldurchgangs. Dieser wird dabei durch einen Vorzeichenwechsel von zwei aufeinanderfolgenden Abtastwerten bestimmt. Nachteil des Verfahrens ist der Quantisierungsfehler, der jedoch durch eine Modifizierung des Verfahrens minimiert werden kann.

Bei der Bestimmung des Vorzeichenwechsels werden zwei aufeinanderfolgende Abtastwerte miteinander verglichen. Sobald sich das Vorzeichen ändert, wird der Nulldurchgang zum

Zeitpunkt des zweiten Abtastwertes festgelegt. Der Fehler entsteht dadurch, dass der Zeitpunkt beliebig zwischen den beiden Abtastwerten liegt (siehe Abbildung 3). Um den Quantisierungsfehler zu minimieren, wird zwischen den Abtastwerten mit unterschiedlichem Vorzeichen interpoliert und eine Gerade mit der Gleichung

$$y(x) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x + \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1}$$

angenommen. Der verbesserte Zeitpunkt x des Nulldurchgangs des Eingangssignals ist die Nullstelle der Funktion. Diese wird ermittelt, indem $y(x) = 0$ gesetzt wird. Daraus folgt

$$x = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{y_2 - y_1}.$$

Mit den aufeinanderfolgenden Abtastwerten $x_1 = k - 1$ und $x_2 = k$ folgt

$$x = k - \frac{y_2}{y_2 - y_1}. \quad (2.2)$$

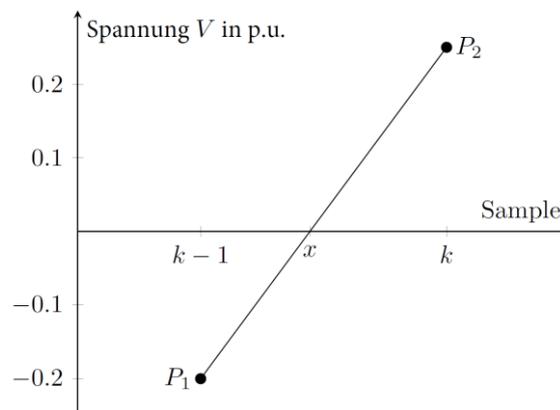


Abbildung 3: Quantisierungsfehler beim Zero-Crossing-Verfahren

2.3.3 Rekursives Gauß-Newton-Verfahren

Bei dem nicht-rekursiven Gauß-Newton-Verfahren (GN) ist die Speicherung von zurückliegenden Messwerten und eine rechenintensive Matrizeninversion notwendig. Im Gegensatz dazu treten beim rekursiven Verfahren diese Nachteile nicht auf [10]. Das Rekursive Gauß-Newton-Verfahren (RGN) lässt sich aus dem GN ableiten, genauso wie der Rekursive-Least-Squares Algorithmus aus dem Least-Squares-Algorithmus [11]. Die Herleitung soll nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung sein, deshalb wird hierfür auf die weiterführende Literatur [12] verwiesen. Das RGN lässt sich nach [11] mit der Gleichung

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{P}_k \mathbf{j}_k (y_{\text{meas}} - y_{\text{est}}) \quad (2.3)$$

mit der Kovarianzmatrix

$$\mathbf{P}_k = \frac{1}{\lambda_k} (\mathbf{P}_{k-1} - \frac{\mathbf{P}_{k-1} \mathbf{j}_k \mathbf{j}_k^T \mathbf{P}_{k-1}}{\lambda_k + \mathbf{j}_k^T \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{j}_k}) \quad (2.4)$$

beschreiben. Die Kovarianzmatrix ist von der Dimension $n \times n$ mit $n = 3$. Dabei ist n die Anzahl der Zeilen des Parametervektors $\mathbf{x} = [A \ \omega \ \phi]$, wobei \mathbf{j}_k^T die k -te Zeile der Jakobimatrix mit den im $(k-1)$ -ten Schritt geschätzten Parametern ist.

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta A} & \frac{\delta f_1}{\delta \omega} & \frac{\delta f_1}{\delta \phi} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\delta f_n}{\delta A} & \frac{\delta f_n}{\delta \omega} & \frac{\delta f_n}{\delta \phi} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Der geschätzte Signalwert y_{est} wird mit

$$y_{\text{est}} = x(1) \cdot \sin(x(2) \cdot t + x(3)) \quad (2.6)$$

berechnet. Bei einem Gedächtnisfaktor $\lambda_k = 1$ werden alle Messwerte gleich stark gewichtet. Bei zeitvarianten Prozessen, wie z.B. Frequenzänderungen in Folge von Störungen mit Wirkleistungsdefizit, sollte $\lambda_k < 1$ gewählt werden. Dies führt zu einer schnelleren Konvergenz, aber auch einer geringeren Genauigkeit [11].

3 Methodik

In den folgenden Abschnitten werden die in Kapitel 2.3 beschriebenen Verfahren in einem Modell eines Energiesystems implementiert. Dazu wird zunächst das verwendete Simulink-Modell näher beschrieben. Anschließend wird die Implementierung der Verfahren in Simulink erläutert. Für die qualitative Bewertung und den Vergleich der Frequenzverläufe werden ein Referenzfall und geeignete Bewertungskriterien definiert.

3.1 Modellierung

Für die Untersuchung der Frequenzschätzverfahren wird die Testbench modelliert. Das Modell besteht aus den folgenden Betriebsmitteln:

- Synchrongenerator (SG) mit einer Bemessungsscheinleistung $S_{\text{rG}} = 10 \text{ MVA}$,
- Eigenbedarf des Synchrongenerators mit $S_{\text{rEigenbedarf}} = 1 \text{ MVA}$,
- EEA mit Vollumrichter, modelliert als selbstgeführter Stromrichter (engl. Voltage Source Converter, VSC) mit einer Bemessungsscheinleistung $S_{\text{rEE}} = 1 \text{ MVA}$ und
- Last modelliert als konstante Impedanz mit $S_{\text{Last}} = 5 \text{ MVA} + \Delta S_{\text{Last}}$

Durch eine sprunghafte Erhöhung der Last um ΔS_{Last} wird ein Lastsprung generiert. Dadurch kann das transiente Verhalten des Energiesystems untersucht und der Frequenzverlauf ausgewertet werden.

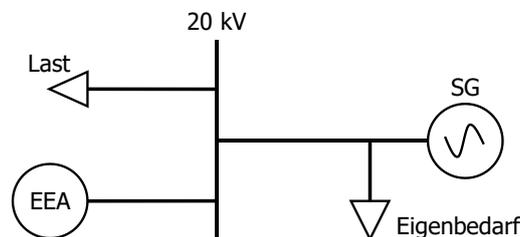


Abbildung 4: Topologie und Kenndaten des verwendeten Modells in Simulink

3.2 Implementierung der Verfahren

In diesem Abschnitt wird die konkrete Umsetzung der Frequenzschätzverfahren in Matlab/Simulink beschrieben. Für die Implementierung der PLL wird ein Simulink-

Standardblock verwendet und angepasst. Da das hier verwendete Eingangssignal kein Rauschen enthält, wird das Moving-Average-Filter aus dem Standardblock entfernt. Da keine weiteren Änderungen erfolgt sind, wird die Implementierung der PLL nicht weiter ausgeführt. In den folgenden Abschnitten wird die Implementierung des ZC und des RGN erläutert.

3.2.1 Zero-Crossing-Verfahren

Die Implementierung des Verfahrens in Simulink ist in Abbildung 5 dargestellt. Zentraler Baustein ist der Funktionsblock „Interpreted MATLAB Fcn“, dessen Programmierung am Ende des Abschnitts vorgestellt wird. Als Eingangsgrößen werden folgende Signale verwendet: Eine Phase der Netzspannung als Leiter-Erde-Spannung u_i in p.u., die um einen Abtastschritt verzögerte Netzspannung u_{i-1} in p.u., die Samplezahl i , sowie die drei Ausgänge des Funktionsblocks, die diesem um einen Abtastschritt verzögert wieder zurückgeführt werden. Diese zurückgeführten Signale sind die geschätzte Frequenz f , der Wert des letzten Nulldurchgangs K_1 und der Wert des aktuellen Nulldurchgangs K_2 .

Die Samplezahl lässt sich aus $i = t_{\text{sim}} \cdot f_s$ mit der Simulationszeit t_{sim} und der Abtastfrequenz f_s bestimmen. Das erste Element y_1 des Ausgangs, der Frequenzschätzwert, wird über den „Rate-Limiter“-Block und ein Tiefpassfilter gefiltert.

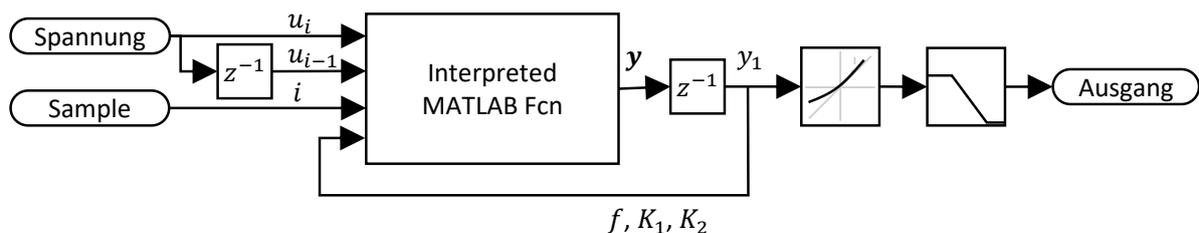


Abbildung 5: Blockschaltbild des Zero-Crossing-Verfahrens in Simulink

Die Programmierung des Funktionsblocks „Interpreted MATLAB Fcn“ ist in einem Ablaufplan in Abbildung 6 dargestellt und wird im Folgenden erläutert:

Zuerst wird abgefragt, ob die Samplenummer $i > 1$ ist, denn bei dem Verfahren werden zwei aufeinanderfolgende Samples verglichen. Im ersten Schleifendurchlauf mit $i = 1$ wird der Ausgang $y = [f \ K_1 \ K_2]^T$ mit den Werten $y = [50 \ 0 \ 0]^T$ beschrieben. Für $i > 1$ wird bei der zweiten Abfrage geprüft, ob ein Nulldurchgang vorliegt. Dies ist der Fall, wenn $u_i \cdot u_{i-1} \leq 0$ ist. Tritt kein Nulldurchgang auf, bleiben die Ausgänge unverändert mit den Werten f , K_1 und K_2 . Bei einem Nulldurchgang werden K_2 und f neu berechnet nach (2.1) bzw. (2.2). Es erfolgt die Ausgabe der Werte von f , K_1 und K_2 .

3.2.2 Rekursives Gauß-Newton-Verfahren

Die Implementierung des Verfahrens in Simulink ist in Abbildung 7 dargestellt. Wie beim ZC ist auch hier der zentrale Baustein der Implementierung der Funktionsblock „Interpreted MATLAB Fcn“. Die Eingänge sind hierbei eine Phase der Netzspannung u_i und die Simulationszeit t , sowie die zwölf Ausgänge y des Funktionsblocks, die diesem mit der Verzögerung von einem Abtastschritt wieder zugeführt werden. Diese rückgeführten Signale sind die drei Elemente des Parametervektors $x = [A \ \omega \ \phi]$ und die 3×3 Elemente der Kovarianzmatrix P .

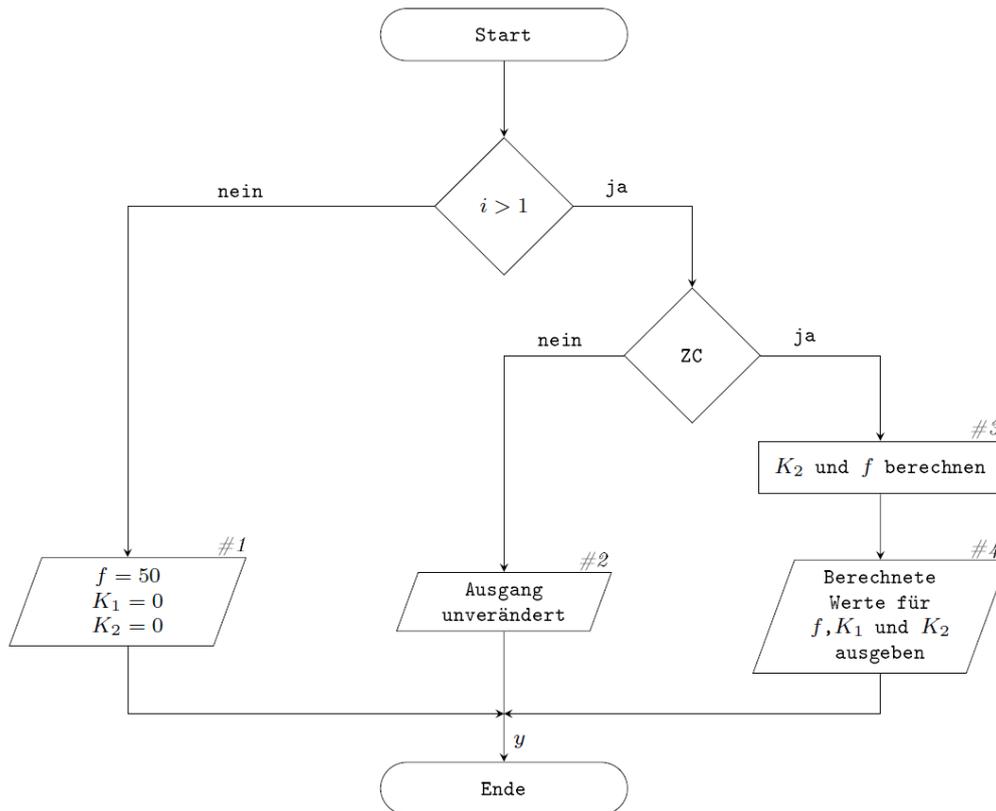


Abbildung 6: Ablaufplan des Zero-Crossing-Verfahrens in Simulink

Das zweite Element des Ausgangsvektors ist die Kreisfrequenz ω , die mit $\frac{1}{2\pi}$ multipliziert und durch einen Rate-Limit $\dot{\omega}_{\max}$ und ein Tiefpassfilter mit der Grenzfrequenz f_g gefiltert wird. Die Programmierung des Funktionsblocks ist in Abbildung 8 als Ablaufdiagramm dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

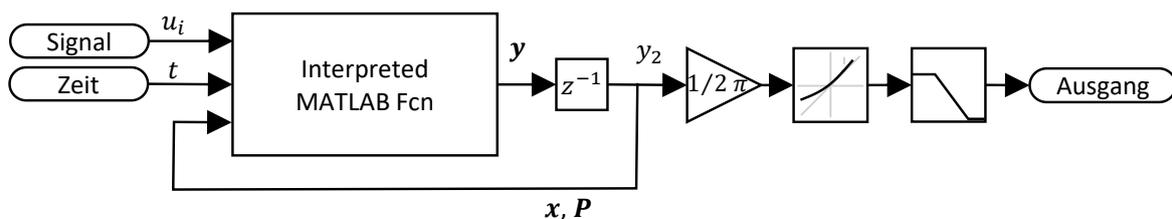


Abbildung 7: Blockschaltbild des Rekursiven Gauß-Newton-Verfahrens in Simulink

Zunächst wird der Zeitpunkt $t = 0$ s abgefragt. Für den Startpunkt $t = 0$ s werden die Anfangsbedingungen des Verfahrens festgelegt. Diese sind gegeben als $\mathbf{x}_0 = [1 \ 2\pi \cdot 50 \ 0]$ und $\mathbf{P}_0 = 1 \cdot 10^4 \mathbf{E}$ für die Kovarianzmatrix. Für alle weiteren Zeitpunkte wird der Parametervektor \mathbf{x} und die Kovarianzmatrix \mathbf{P} mit den Werten aus den rückgeführten Eingangssignalen des Parametervektors \mathbf{x} und der Kovarianzmatrix \mathbf{P} . Mit dem Modulo-Operator wird die Bedingung $\text{mod}\left(\frac{1}{f_s}, \frac{200}{f_s}\right) = 0$ überprüft. Diese ist nur für jeden 200. Abtastschritt erfüllt. Durch das Einführen dieser Bedingung werden bessere Ergebnisse nach den Bewertungskriterien in Abschnitt 3.4 erzielt, die weniger oszillieren. Ist diese Bedingung erfüllt, werden die Zeile der Jakobimatrix \mathbf{j}_k^T nach (2.5), die Kovarianzmatrix \mathbf{P}_k nach (2.4) mit $\lambda_k = 0,9$ und der geschätzte Signalwert y_{est} nach (2.6) berechnet.

Der nach (2.3) aktualisierte Parametervektor x , der die geschätzte Kreisfrequenz enthält, und die Kovarianzmatrix P werden ausgegeben.

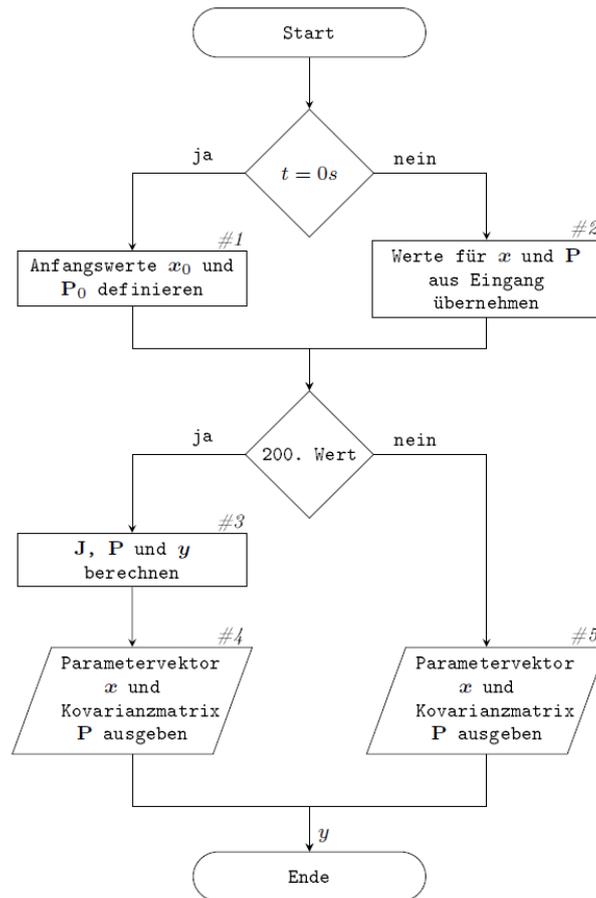


Abbildung 8: Ablaufplan des Rekursiven Gauß-Newton-Verfahrens in Simulink

3.3 Referenzfall

Um die Verfahren unter gleichen Bedingungen zu vergleichen wird im nächsten Kapitel ein Referenzfall erstellt. Dabei wird für die Simulationen ein Zeitraum von $t = 1,5$ s gewählt. Zusätzlich zur Grundlast von 5 MVA wird das System zum Zeitpunkt $t = 0$ s mit einem Lastsprung von $\Delta S_{\text{Last}} = 3$ MVA beaufschlagt.

3.4 Bewertungskriterien

Für die qualitative Bewertung und den objektiven Vergleich der Schätzergebnisse müssen einheitliche Kriterien definiert werden. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben wird die Primärregelung aktiviert, wenn die Frequenz im Energiesystem um mehr als ± 10 mHz von der Nennfrequenz abweicht. Bei Abweichungen von mehr als 200 mHz werden zusätzliche Sicherheitsmechanismen ausgelöst. Damit es nicht zu einer falschen Auslösung dieser Mechanismen kommt ist es wichtig, dass das Signal möglichst genau geschätzt wird und die maximale Abweichung gering bleibt. In den technischen Anwendungsregeln VDE-AR-N-4110 [13] ist eine maximale Abweichung der Frequenz im eingeschwungenen Zustand von ± 10 mHz vorgegeben. Bei schnellen Frequenzänderungen soll die minimale Genauigkeit bei ± 50 mHz liegen.

Von dieser Motivation ausgehend werden drei Kriterien definiert, nach denen die Ergebnisse der Schätzverfahren bewertet werden. Dabei wird ein Hauptkriterium festgelegt, welches das Ziel der Optimierung der Parameter ist. Die Nebenkriterien dienen zur zusätzlichen Bewertung und Beschreibung der Schätzergebnisse. Diese Kriterien sind:

- Hauptkriterium: Eine große Abweichung des Schätzwertes von der tatsächlichen Netzfrequenz kann weitreichende Folgen für das Energienetz haben. Deshalb ist das Ziel der Optimierung der Verfahren, eine möglichst geringe maximale Abweichung

$$\Delta_{\max} = \max|\hat{f}(t) - f_{SG}(t)|$$

einzustellen. Dabei ist $\hat{f}(t)$ der geschätzte Frequenzverlauf und $f_{SG}(t)$ der Frequenzverlauf des Synchrongenerators als Vergleichswert.

- Nebenkriterium 1: Die Frequenzverläufe zweier Schätzverfahren mit gleicher maximaler Abweichung können sehr unterschiedlich ausfallen. Deshalb wird auch die Fehlerfläche

$$\Delta_A = \int_0^{1,5} |\hat{f}(t) - f_{SG}(t)| dt$$

über den Simulationszeitraum ausgewertet.

- Nebenkriterium 2: Die geschätzte Frequenz am Anschlussknoten der EEA kann für die Regelung dieser Anlagen verwendet werden. Deshalb ist es zweckmäßig, dass die Frequenzverläufe – als Eingangsgröße dieser Regelungen – einen glatten Verlauf aufweisen. Als Kriterium wird qualitativ ausgewertet, wie glatt der geschätzte Frequenzverlauf ist.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden Simulationen mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Modell und Referenzfall durchgeführt und die Parameter der Frequenzschätzverfahren optimal eingestellt. Dazu werden die Einflussfaktoren der einzelnen Verfahren identifiziert und so eingestellt, dass optimale Schätzergebnisse bzgl. der definierten Bewertungskriterien erzielt werden. Die Ergebnisse der Frequenzschätzverfahren mit den optimal eingestellten Parametern werden im Folgenden dargestellt, verglichen und diskutiert.

4.1 PLL

Das Ergebnis des Frequenzschätzverfahrens mittels PLL f_{PLL} , mit den eingestellten Parametern aus Tabelle 1, ist in Abbildung 9 im oberen Graphen dargestellt (blaue Kurve). Im Frequenzverlauf tritt eine Schwingung bei $t = 0,15$ s auf. Während des weiteren zeitlichen Verlaufs weist das Ergebnis einen glatten Verlauf ohne Schwingungen auf. Im unteren Graphen ist der zeitliche Verlauf der Abweichung des Schätzergebnisses zur Generatorfrequenz abgebildet. Die maximale Abweichung tritt nach $t = 0,6$ s auf und beträgt $\Delta_{\max} = 8,384$ mHz. Die Fehlerfläche über den betrachteten Zeitraum beläuft sich auf $\Delta_A = 6,163$ mHz · s. Am Ende des Simulationszeitraums ist der stationäre Zustand noch nicht erreicht. Am Ende der Simulationsdauer bleibt eine Abweichung der Schätzung, da das Schätzverfahren den stationären Zustand noch nicht erreicht hat. Dies liegt u.a. an der großen Zeitkonstante T_N des PID-Reglers, sodass bei einer längeren Simulationsdauer die Frequenz genau geschätzt werden kann.

Tabelle 1: Optimierte Werte der PLL für den Referenzfall

Rate Limit $\dot{\omega}_{\max}$	Grenzfrequenz Tiefpassfilter f_g	k_p	k_i	k_d	T_N
0,85 Hz/s	25 Hz	30	$1 \frac{1}{s}$	0,04 s	30 s

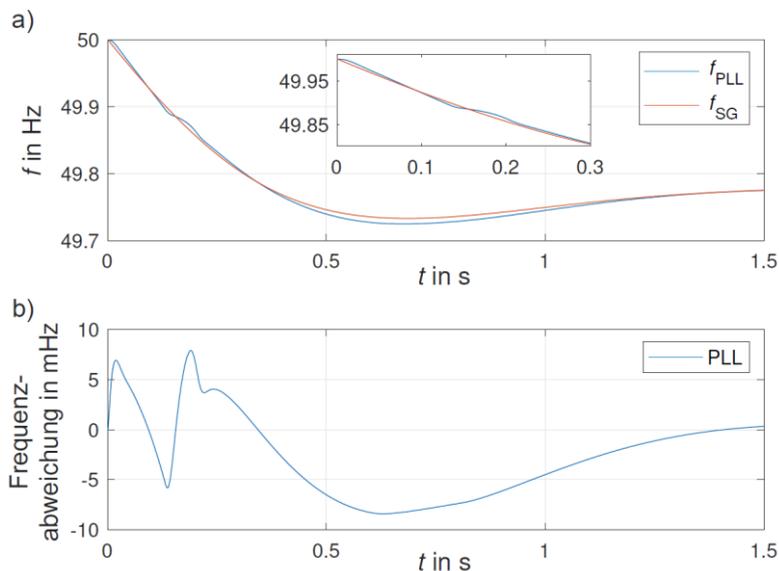


Abbildung 9: Simulationsergebnisse des PLL-Verfahrens a) Frequenz und b) Abweichung der Frequenzen

4.2 Zero-Crossing-Verfahren

Das Ergebnis der Simulation des ZC-Verfahrens in Simulink ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**a dargestellt (oberer Graph, blaue Kurve). Für die Parameter werden die Werte aus Tabelle 2**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verwendet. Die Frequenz wird zunächst über- und dann unterschätzt. Im zeitlichen Verlauf treten jedoch keine weiteren Schwingungen auf. Im unteren Graphen ist der zeitliche Verlauf der Abweichung des Frequenzschätzergebnisses zur Generatorfrequenz abgebildet. Die maximale Abweichung liegt bei ca. $t = 0,45$ s und beträgt $\Delta_{\max} = 13,36$ mHz. Die Fehlerfläche über den betrachteten Zeitraum ist $\Delta_A = 9,540$ mHz · s. Am Ende des Simulationszeitraums bleibt eine Abweichung bestehen, da der stationäre Zustand noch nicht erreicht wird.

Tabelle 2: Optimierte Werte des Zero-Crossing-Verfahrens für den Referenzfall

Rate Limit $\dot{\omega}_{\max}$	Grenzfrequenz Tiefpassfilter f_g
0,75 Hz/s	25 Hz

4.3 Rekursives Gauß-Newton-Verfahren

In Abbildung 10**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**b ist das Ergebnis des RGN-Verfahrens in Simulink dargestellt (oberer Graph, blaue Kurve). Für die Parameter wurden die Werte aus Tabelle 3**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verwendet. Das Ergebnis hat einen glatten Verlauf bis zum Zeitpunkt $t = 0,25$ s, danach treten hochfrequente Schwingungen mit kleiner Amplitude auf. Im unteren Graphen ist der zeitliche Verlauf der Abweichung des Frequenzschätzergebnisses zur Generatorfrequenz dargestellt. Die maximale Abweichung tritt bei ca.

$t = 0,55$ s auf und beträgt $\Delta_{\max} = 11,56$ mHz. Die Fehlerfläche im betrachteten Zeitraum ist $\Delta_A = 7,516$ mHz · s. Am Ende des Simulationszeitraums bleibt eine Abweichung bestehen, da der stationäre Zustand noch nicht erreicht wurde.

Tabelle 3: Optimierte Werte des Rekursiven Gauß-Newton-Verfahrens für den Referenzfall

Rate Limit $\dot{\omega}_{\max}$	Grenzfrequenz Tiefpassfilter f_g	Korrekturfaktor λ_k
0,8 Hz/s	20 Hz	0,9

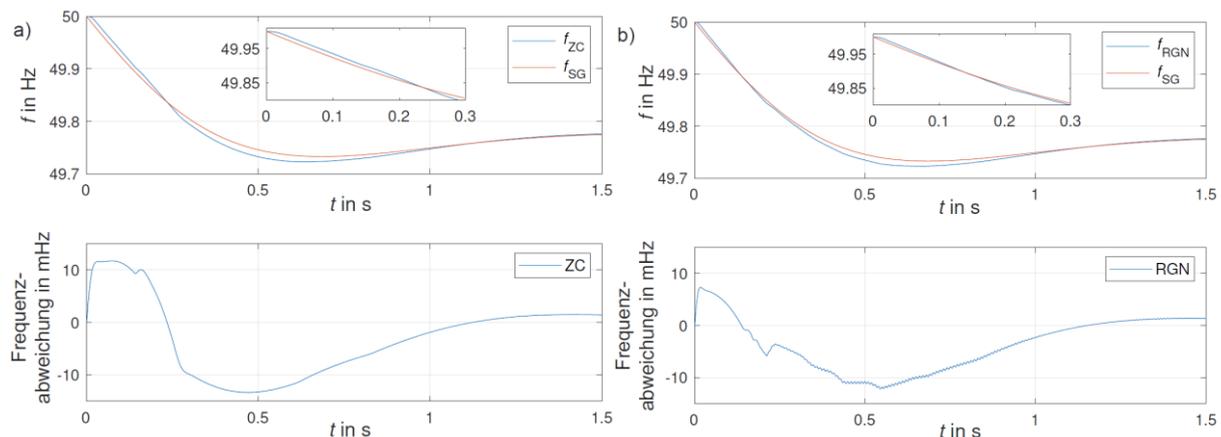


Abbildung 10: Simulationsergebnisse a) des ZC-Verfahrens und b) RGN-Verfahrens

4.4 Vergleich der Verfahren

Die Ergebnisse aus diesem Kapitel sind in Tabelle 4 für alle Verfahren bei einem Lastsprung von $\Delta S_{\text{Last}} = 3$ MVA zusammengefasst. Dabei werden von allen Schätzverfahren Ergebnisse erzielt, die nah an dem Frequenzverlauf des SG liegen.

Tabelle 4: Vergleich der Schätzverfahren

Verfahren	Max. Abweichung Δ_{\max} in mHz	Fehlerfläche Δ_A in mHz·s	Glatter Verlauf
PLL	8,384	6,163	ja
ZC	13,360	9,540	ja
RGN	11,560	7,516	nein

Der zeitliche Verlauf der Abweichung zur Generatorfrequenz für die drei echtzeitfähigen Verfahren ist in Abbildung 11 zusammenfassend gezeigt. Durch das RGN-Verfahren wird ein Frequenzverlauf mit geringer Abweichung erzielt, jedoch tritt hier eine starke Oszillation der Schätzwerte auf. Diese kann durch eine stärkere Filterung reduziert werden, wodurch jedoch auch die Güte der Schätzung abnimmt. Mit dem ZC-Verfahren werden im Vergleich die größten Abweichungen erreicht, jedoch bei einem sehr glatten Verlauf (rote Kurve). Die Frequenzschätzung mittels PLL erzielt bei den Online-Schätzverfahren die Ergebnisse mit der geringsten maximalen Abweichung und einem glatten Verlauf (blaue Kurve). Der Einschwingvorgang zur neuen stationären Frequenz erfolgt schneller als bei den anderen Verfahren.

Beim Vergleich aller Verfahren erzielt die Frequenzschätzung mittels PLL die besten Ergebnisse, jedoch ist die Einstellung der Parameter zur Optimierung des Verfahrens am aufwendigsten. Die Ergebnisse

des RGN-Verfahrens werden durch die Schwingungen im Verlauf stark beeinträchtigt. Bei einer stärkeren Filterung und der damit einhergehenden steigenden Abweichung fallen die Ergebnisse dieses Verfahrens noch schlechter aus. Mit dem ZC-Verfahren werden die größten Abweichungen erzielt, jedoch steht dem gegenüber ein glatter Verlauf und die einfache Einstellung der Parameter.

Insgesamt wird durch alle Verfahren die Frequenz des SG gut geschätzt, wobei eine maximale Abweichung von $\Delta_{max} = 13,360$ mHz nicht überschritten wird. Mit allen Verfahren wird eine Genauigkeit von $\Delta_{max} < 50$ mHz erreicht, wie sie in [13] für den transienten Bereich gefordert wird, vgl. Abschnitt 3.4.

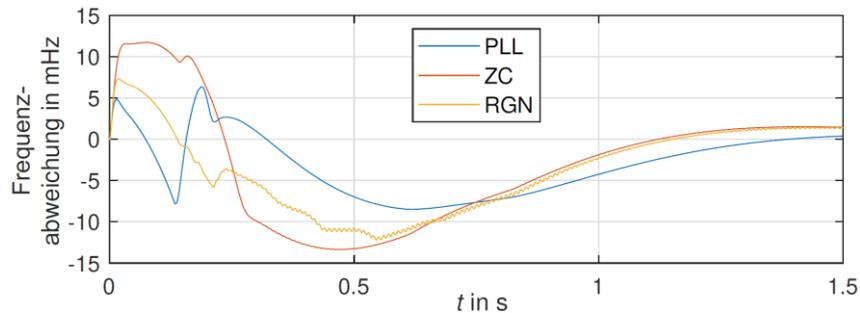


Abbildung 11: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Abweichung der Online-Schätzverfahren

5 Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden wird die Robustheit der Schätzverfahren auf die Änderung von Eingangsgrößen untersucht. Dazu wird das System nach Abbildung 4 mit Lastsprüngen von $\Delta S_{Last} = 2 \dots 5$ MVA beaufschlagt und geprüft, wie sich die Schätzalgorithmen bei gleicher Parameterwahl verhalten. In Abbildung 12 ist die Frequenzschätzung mittels PLL bei verschiedenen Lastsprüngen dargestellt. Dabei werden die Parameter der Schätzverfahren nicht verändert, sodass die Verfahren für einen Lastsprung von $\Delta S_{Last} = 3$ MVA optimale Ergebnisse liefern. Die Abbildungen zeigen, dass durch die Veränderung der Höhe des Lastsprungs und gleichbleibenden Parametern die Güte der Ergebnisse des Schätzverfahrens in dem ersten Zeitraum nach dem Lastsprung abnimmt.

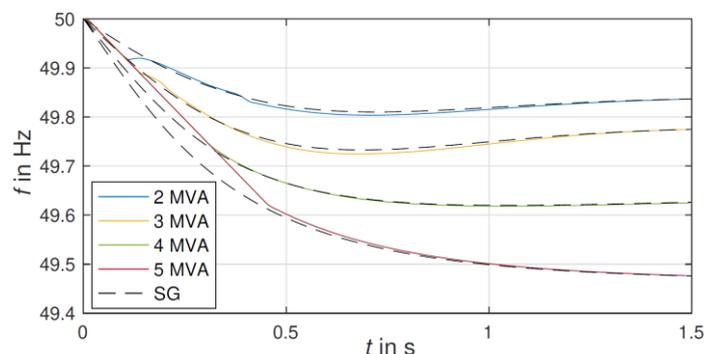


Abbildung 12: Frequenzverläufe der PLL bei verschiedenen Lastsprüngen

Für die drei Verfahren PLL, RGN und ZC werden die Parameter nun so eingestellt, dass für jeden Lastsprung individuell die Abweichung der geschätzten Frequenz zur Generatorfrequenz sowie die Fehlerfläche der beiden Frequenzkurven minimiert werden. Diese optimierten Parameter werden in Abbildung 13 dargestellt.

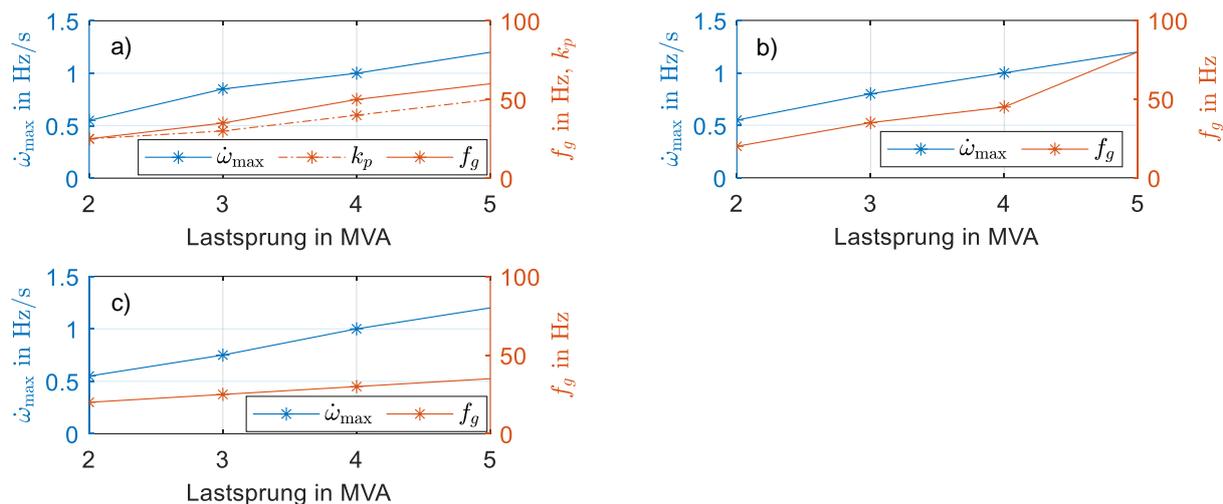


Abbildung 13: Optimierte Parameter für die Verfahren a) PLL b) RGN und c) ZC

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Güte der Verfahren variiert sobald der Lastsprung verändert wird. Das ZC-Verfahren weist dabei die größte Robustheit gegenüber Änderungen der Größe des Lastsprungs auf, insbesondere ist die Güte der Schätzung weitestgehend unabhängig von den Parametern des Verfahrens. Zudem sind die Verläufe in Abbildung 13 direkt proportional zur Größe des Lastsprungs. Dies ermöglicht eine einfache Implementierung der Abhängigkeit in Simulationsumgebungen. Dem entgegen stehen jedoch wenige Freiheitsgrade bei der Optimierung für dieses Verfahren, sodass bei der Optimierung für einen speziellen Auslegungsfall die PLL die besseren Ergebnisse liefert, vgl. Kapitel 4.4.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Frequenzschätzung im Energiesystem ist die Anwendung von echtzeitfähigen Verfahren notwendig, bei denen die Messung und Auswertung der Frequenz in Echtzeit bzw. live erfolgt. Nach einer Störung im System werden transiente Ausgleichsvorgänge hervorgerufen. Die Transiente Frequenz, d.h. die Frequenz im Kurzzeitbereich nach einer Störung bevor ein erneuter quasistationärer Zustand erreicht ist, kann durch verschiedene Verfahren indirekt aus einer Spannungsmessung geschätzt werden. Die bereits weitverbreitete Lösung der PLL liefert zufriedenstellende Ergebnisse, nachdem die relevanten Parameter optimiert sind. Auch die beiden Verfahren Zero-Crossing und Rekursive-Gauss-Newton können die durch die technischen Anschlussregeln in VDE-AR-N-4110 vorgegebenen Genauigkeiten erfüllen. Es bleiben jedoch Abweichungen zwischen den geschätzten Frequenzen und der zum Vergleich herangezogenen mechanischen Frequenz eines Synchrongenerators. Insbesondere die verwendeten Filter können nur für einen speziellen Referenzfall optimiert werden.

Hinsichtlich der maximalen Abweichung und der Fehlerfläche liefert die optimierte PLL die beste Frequenzschätzung. Aber auch das Zero-Crossing-Verfahren und das Rekursive-Gauss-Newton-Verfahren liefern Schätzergebnisse mit einer maximalen Frequenzabweichung von ± 15 mHz und liegen damit sehr gut in dem geforderten Toleranzband von ± 50 mHz.

Zur Untersuchung der Robustheit der Frequenzschätzverfahren wird die Höhe des Lastsprunges und damit der Frequenzverlauf in einer Testbench variiert. Die Anzahl sensibler Parameter, welche einen Einfluss auf die Güte der Frequenzschätzung haben, liegt für die PLL

bei drei, für das Zero-Crossing- und das Rekursive-Gauss-Newton-Verfahren bei zwei. Eine Optimierung der Parameter der drei Frequenzschätzverfahren für verschiedene Lastsprünge zeigt, dass das Zero-Crossing-Verfahren die geringsten Anpassungen benötigt und somit die Frequenz für verschiedene Szenarien am robustesten schätzen kann. Zudem weisen die sensitiven Parameter des Verfahrens einen linearen Zusammenhang zur Höhe des Lastsprunges auf. Dieser Zusammenhang lässt sich in Simulationen einfach implementieren, sodass die Instantane Frequenz sehr gut geschätzt werden kann.

Für die Simulation von Energiesystemen bieten die Ergebnisse die Möglichkeit einer robusten und genauen Schätzung der Frequenz, welche für das jeweils betrachtete Ereignis optimiert werden kann. So kann auch in Simulationen ohne rotierende Betriebsmittel verlässlich die Frequenz ausgewertet werden. Im realen System ist dagegen das Ereignis nicht bekannt, sodass es hierfür einer Optimierung über verschiedene Szenarien bedarf.

Referenzen

- [1] A. Schwab. *Elektroenergiesysteme Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [2] F. Milano et al. „Foundations and Challenges of Low-Inertia Systems (Invited Paper)“. In: 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). IEEE, Jun. 2018.
- [3] B. Boashash. „Estimating and Interpreting the Instantaneous Frequency of a Signal. I. Fundamentals“. In: Proceedings of the IEEE, Apr. 1992, S. 520–538.
- [4] J. Machowski. *Power System Dynamics: Stability and Control*. Chichester, U.K: Wiley, 2008.
- [5] N. Hatziargyriou et al. „Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended“. In: IEEE Transactions on Power Systems 36.4, Jul. 2021.
- [6] R. Best. *Phase Locked Loops: Design, Simulation and Applications*. IRWIN, Aug. 2007.
- [7] A. Ortega und F. Milano. „Comparison of Different PLL Implementations for Frequency Estimation and Control“. In: 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, Mai 2018.
- [8] S. Martin-Martinez et al. „A New Three-Phase DPLL Frequency Estimator Based on Nonlinear Weighted Mean for Power System Disturbances“. In: IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, Jan. 2013, S. 179–187.
- [9] A. Carcelen-Flores et al. „Comparison of Instantaneous Frequency Estimation Algorithms Under Power System Disturbances“. In: 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, Juli 2012.
- [10] V. Terzija. „Dynamische Frequenzmessung durch ein Verbessertes Rekursives Newton-Raphson-Parameterschätzverfahren“. In: Archiv für Elektrotechnik Vol. 77. Springer Verlag, Sep. 1994, S. 407–414.
- [11] V. Terzija. „Improved Recursive Newton-Type Algorithm for Frequency and Spectra Estimation in Power Systems“. In: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 52. IEEE, Okt. 2003, S. 1654–1659.
- [12] W. Kemmetmüller. Prozessidentifikation, Vorlesung und Übung WS2012/2013. TU Wien, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik. 2012.
- [13] *Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung)*, VDE-AR-N 4110, VDE, Nov. 2018.