

VERTEILTE MODELLPRÄDIKTIVE REGELUNG VON ENERGIE NETZEN AM BEISPIEL DES WSCC 9 BUS SYSTEMS

Ergebnisse des BMWi-Projekts MathEnergy (FKZ 0324019A)

Zuordnung: Mathematische Methoden II: Zustandsschätzung, Optimierung, Ensemble-Analyse
Anwendungen: Demonstratoren Strom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Bearbeitung

Dr. Andreas Wirsén, Dr. Paulo Mendes, Jens Göbel
Abteilung Systemanalyse, Prognose und Regelung
Fraunhofer Institut für Techno- und
Wirtschaftsmathematik ITWM

Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern
E-Mail: andreas.wirsén@itwm.fraunhofer.de

- **Mathematische Methoden I: Modellreduktion, effiziente Formulierung und Lösung**
 - AD-Net Power
 - Netzmodellierungsframework zur Zustandsschätzung und Regelung
- **Mathematische Methoden II: Zustandsschätzung, Optimierung, Ensemble-Analyse**
 - Schätzung Schaltzeitpunkt und Topologie basierend auf der Theorie geschalteter DAE ([1,4])
 - Dynamische Zustandsschätzung mittels (Constrained) Extended Kalman-Filter (siehe Demonstratoren)
 - (Verteilte) Modellprädiktive Regelung (Kollokationsansätze / Consensus ADMM)
- **Anwendungen: Demonstratoren und Studien zu Strom- und/oder Gasnetz-Szenarien**
 - **Verteilte Modellprädiktive Regelung von Energienetzen am Beispiel des WSCC 9 Bus Systems**
 - **Sektorkopplung mit AD-Net**
 - SimBench Netz Deutschland (BMW SimBench) von TU Dortmund und TU Berlin

Publikationen

Im Rahmen von MathEnergy

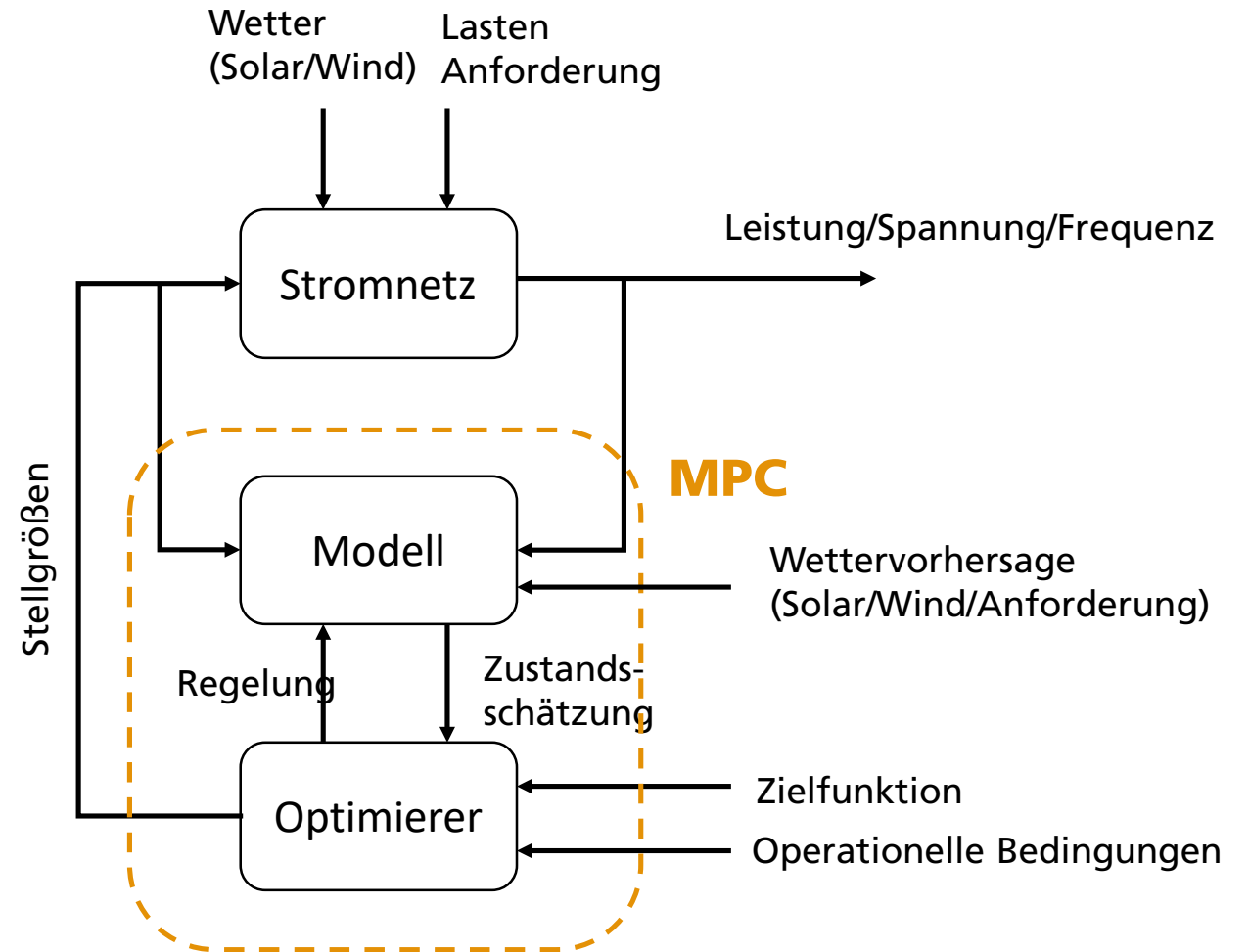
1. MathEnergy – Mathematical Key Technologies for Evolving Energy Grids, In T. Clees, A. Baldin, P. Benner, S. Grundel, C. Himpe, B. Klaassen, F. Küsters, A. Wirsén et al. (Eds.), KoMSO - MSO for Power Engineering and Management, Springer, accepted 29 June 2020.
2. Morgenstern, D.; Görges, D.; Wirsén, A.: Obtaining a Stabilizing Prediction Horizon in Quadratic Programming Model Predictive Control. IEEE 58th Conference on Decision and Control, CDC 2019 : Nice, France, December 11-13, 2019, DOI: 10.1109/CDC40024.2019.9030254
3. Küsters, F.; Trenn, S.; Wirsén, A.: Switch-observer for switched linear systems. IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC), pp.1749-1754 (Melbourne, Australia 2017)

Graduierungsarbeiten im Umfeld von MathEnergy

4. F. Küsters: Switch Observability for Differential-Algebraic Systems – Analysis, Observer Design and Application to Power Networks, PHD-Thesis Technical University Kaiserslautern, 2018, ISBN: 3839613744
5. Max Aehle : Simulation of Gas Pipelines via Asymptotic Expansions. Master's Thesis, FB Mathematik , TU Kaiserslautern, 2020

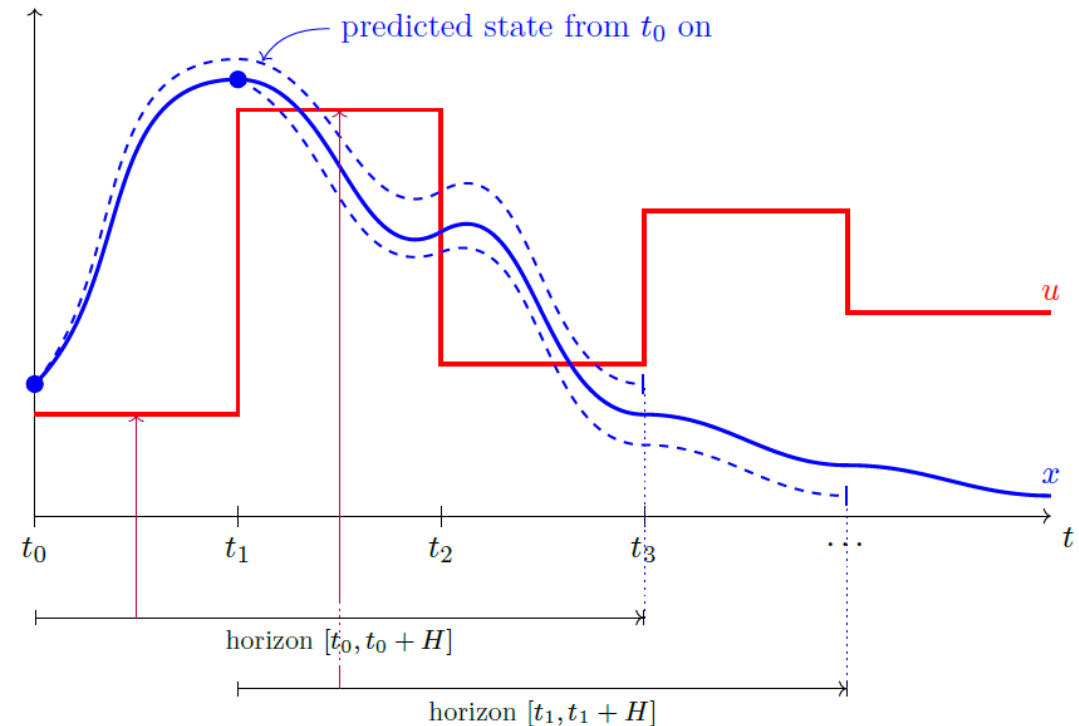
Was ist Modellprädiktive Regelung (MPC)?

- Im Rahmen der modellprädiktiven Regelung werden für einen vorgegebenen Zeithorizont die Stellgrößen für das System (Stromnetz) unter Vorgabe von Zielfunktionen z.B. zur Frequenz- und Spannungsstabilisierung unter Berücksichtigung von operationellen Bedingungen durch Lösung eines Optimierungsproblems berechnet.
- Im Vergleich zur klassischen Feedback-Regelung reagiert ein modellprädiktiver Regler damit nicht nur auf die aktuellen und historische Zustände, sondern betrachtet auch die zukünftige mögliche Entwicklung des Systems



Was ist Modellprädiktive Regelung (MPC)?

- Wenn das System und dessen Vorhersagen exakt wären, könnte man das Problem als Steuerungsproblem über einen (un)endlichen Zeithorizont betrachten und für diesen alle Stellgrößen für den berechneten Zeithorizont vorgeben.
- Aufgrund von Modellunsicherheiten, Störungen etc. trifft diese Annahme aber nicht zu. Daher gibt man beim MPC nur die Stellgröße für den nächsten Zeitschritt für das System vor.
- Nach einem definierten Zeitschritt misst / schätzt man die Zustände des Systems und wählt den neuen Zustandsvektor als Startwert für die Optimierung im nächsten Zeitschritt über den nächsten gewählten Prädiktionshorizont.
- Man wiederholt die Schritte der Stellgrößenvorgabe, Zustandsschätzung und Optimierung iterativ

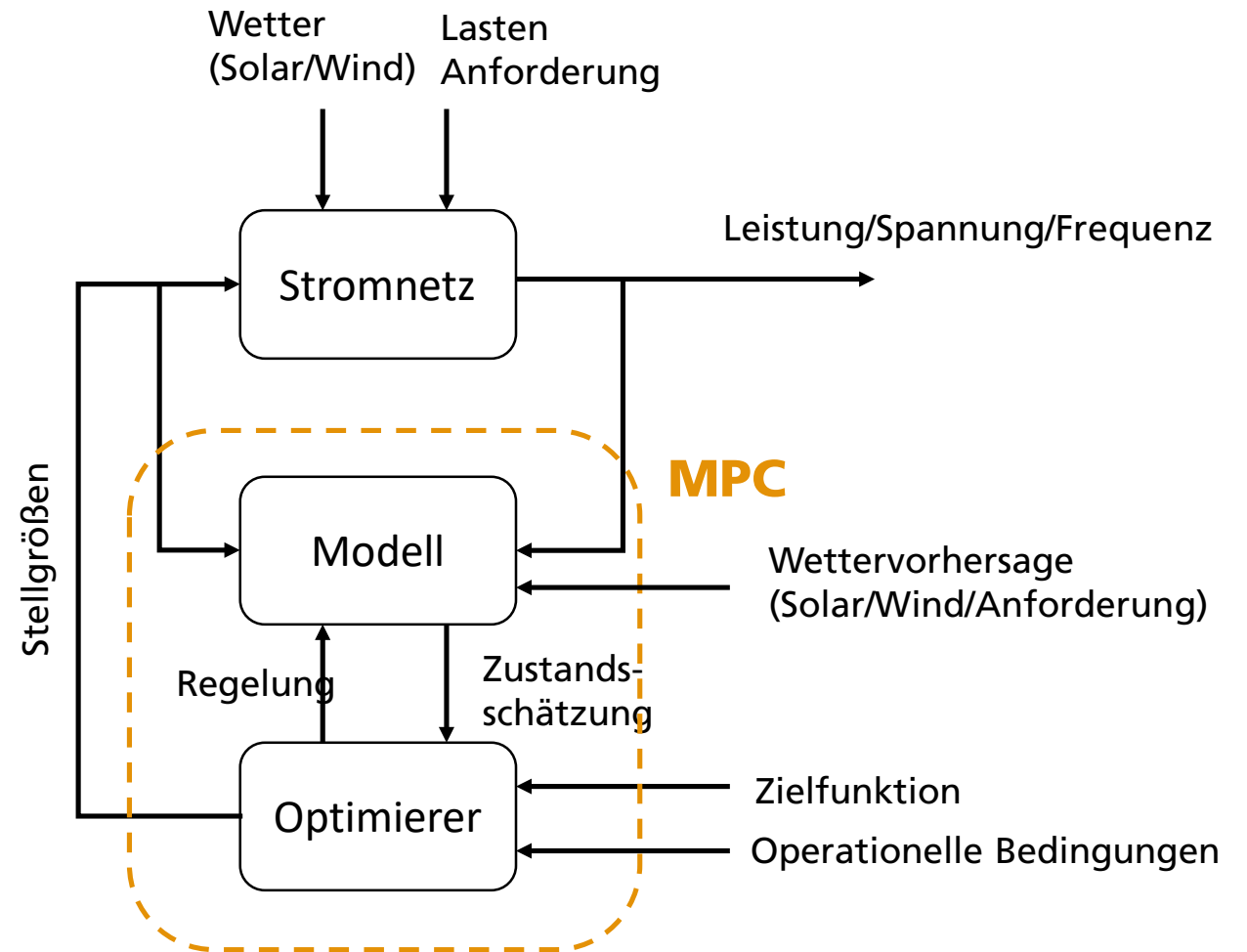


Modellprädiktive Regelung

Für die modellprädiktive Regelung werden in jedem Zeitschritt folgende Informationen benötigt:

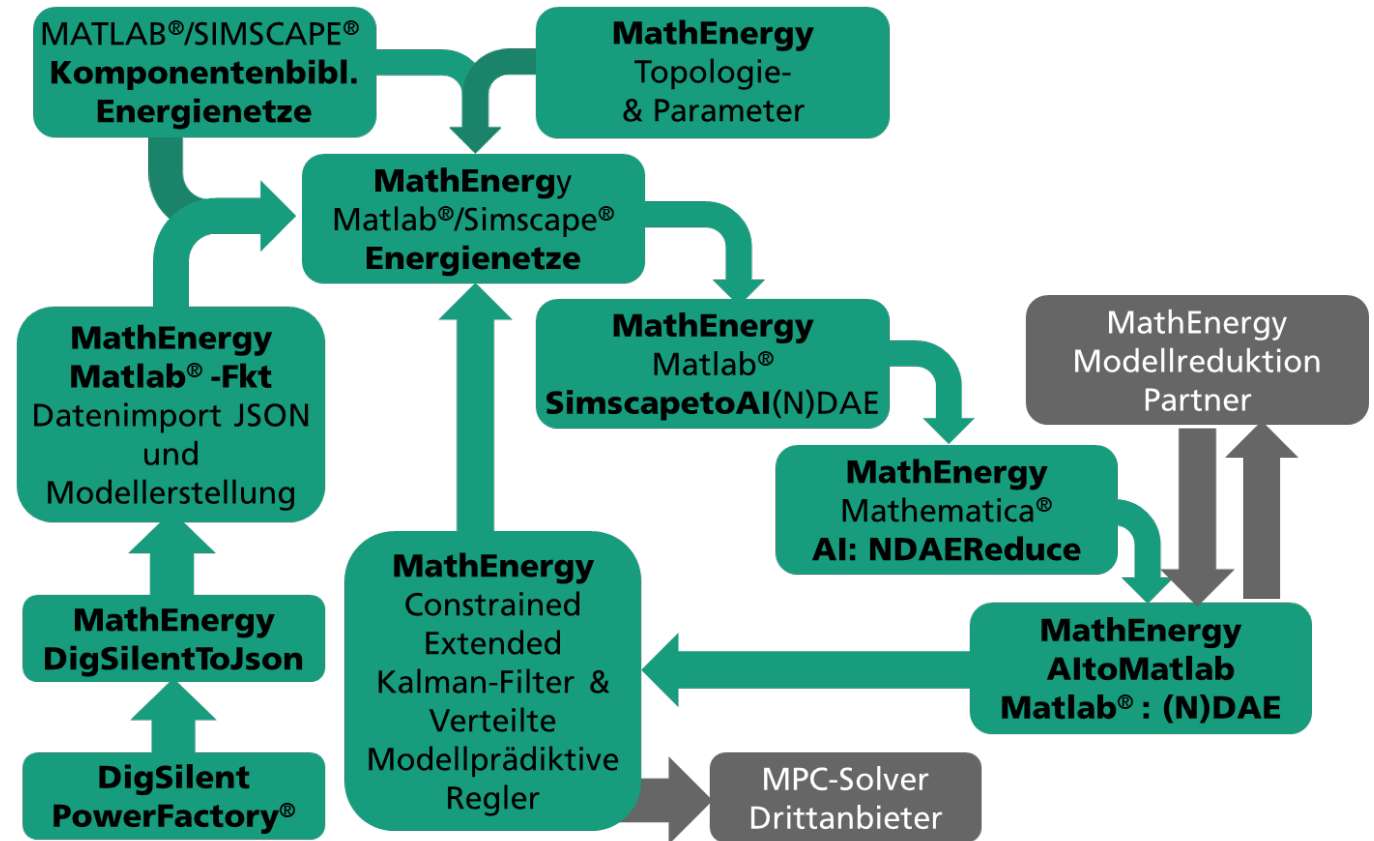
- Modell (ODE / DAE) des dynamischen Systems
- Rahmen- und Randbedingungen zum operationellen Betrieb
- Zielfunktionen
- Aktuelle Systemzustände aus Messungen oder einer Zustandsschätzung
- Vorhersagen zu Erzeugung und Lasten aus Wettervorhersagen / Einspeiseprognose und Lastanforderungen

Bemerkung: Auch wenn nicht alle Lasten und Einspeiseinformationen verfügbar sind, können die Stellgrößen berechnet werden.



MathEnergy – Tools und Workflow zur Zustandsschätzung und modellprädiktiven Regelung

- Für die Simulation von stationären und transienten Vorgängen in elektrischen Netzen gibt es eine Reihe von Simulatoren.
- Herausforderung ist, dass man für die dynamische Zustandsschätzung und für die Regelung die dynamischen Modellgleichungen benötigt, die nicht direkt exportiert bzw. zur Verfügung gestellt werden können.
- In MathEnergy wurde u. A. ein Workflow implementiert, mit dem die Modelle von Digsilent Powerfactory® exportiert und automatisiert in Algorithmen zur Zustandsschätzung und Regelung auf Basis integriert werden können.



MathEnergy: Modellierungsansätze für dynamische Systemmodelle zur Zustandsschätzung und MPC

Für die Modellierung transienten Verhaltens von dynamischen Systemen im Rahmen von MathEnergy wurden verschiedene mathematischen Modellierungsansätze verwendet.

Auch für die Modellierungen des Stromnetze wurde in MathEnergy eine dieser Darstellungen verwendet.

	Lineares System	Nichtlineare Systeme
Kontinuierliche Modelle (ODE/DAE)	$E\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$	$E\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$
Geschaltete ODE /DAE	$E_{\sigma}\dot{x}(t) = A_{\sigma}x(t) + B_{\sigma}u(t)$	$E_{\sigma}\dot{x}(t) = f(x(t), \sigma(t), u(t))$
Diskrete Modelle (ODE/DAE)	$Ex_{k+1} = Ax_k + Buk$	$Ex_{k+1} = f(xk, uk)$
Messgleichungen	$y(t) = Cx(t) + Du(t)$ $y(t) = C_{\sigma}x(t) + D_{\sigma}u(t)$ $y_{k+1} = Cx_k + Duk$	$y(t) = h(x(t), u(t))$ $y(t) = h(x(t), \sigma(t), u(t))$ $y_{k+1} = h(xk, uk)$

MathEnergy: Dynamische Zustandsschätzung

Im Rahmen von MathEnergy wurden seitens des Fraunhofer ITWM folgende Zielstellungen analysiert:

1. Zustandsschätzung zur Identifikation von Strukturänderungen / Topologieänderungen des Netzes auf Basis von linearen geschalteten DAEs.
Ziel: Ermittlung von Schaltzeitpunkten / Ausfallzeiten und der neuen Netzstruktur nach z.B. Leitungsausfall → siehe [1,4]
2. Ermittlung nicht gemessener dynamischer und algebraischer Zustände im Rahmen der modellprädiktiven Regelung
 1. Lineare Netzmodelle (Lineare Differentialalgebraische Systeme)
 2. Nichtlineare Netzmodelle (Nichtlineare Differentialalgebraische Systeme)

MathEnergy Ansatz für Zustandsschätzung: Extended Kalman Filter (EKF) / Constrained Extended Kalman Filter (CEKF)

Schätzung dynamischer Zustände im Rahmen des MPC mit DAE

Ansatz: (Constrained) Extended Kalman Filter (CEKF)

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k, w_k),$$

$$y_k = h(x_k, u_k = 0, v_k),$$

$$Fx_k = b,$$

Vorhersage

1. Vorhersage:

$$\tilde{x}_k = f(\bar{x}_{k-1}, u, 0)$$

$$\tilde{P}_k = \hat{A}_k \bar{P}_{k-1} \hat{A}_k^T + Q_k$$

$$\text{mit } \hat{A}_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\bar{x}_{k-1}}$$

Prozessrauschen: $w_k \sim N(0, Q_k)$

Messrauschen: $v_k \sim N(0, R_k)$

Nebenbedingungen

Korrektur Messungen

2. Residuum

$$e_k = y_k - h(\tilde{x}_k, 0, 0)$$

3. KalmanGain

$$S_k = H_k \tilde{P}_k H_k^T + R_k$$

$$K_k = \tilde{P}_k H_k^T S_k^{-1} \quad H_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\tilde{x}_k}$$

4. Fehlerkorrektur

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + K_k e_k$$

$$\hat{P}_k = (I - K_k H_k) \tilde{P}_k$$

Korrektur NB

5. Residuum

$$\tilde{e}_k = b - F \hat{x}_k$$

6. KalmanGain

$$\tilde{S}_k = F \hat{P}_k F^T + 0$$

$$G_k = \hat{P}_k F^T \tilde{S}_k^{-1}$$

7. Fehlerkorrektur

$$\bar{x}_k = \hat{x}_k + G_k \tilde{e}_k$$

$$\bar{P}_k = (I - G_k F) \hat{P}_k$$

Bemerkungen

Grün: Extended Kalman Filter
Rot + Grün: Constrained Extended Kalman Filter

Vorhersage

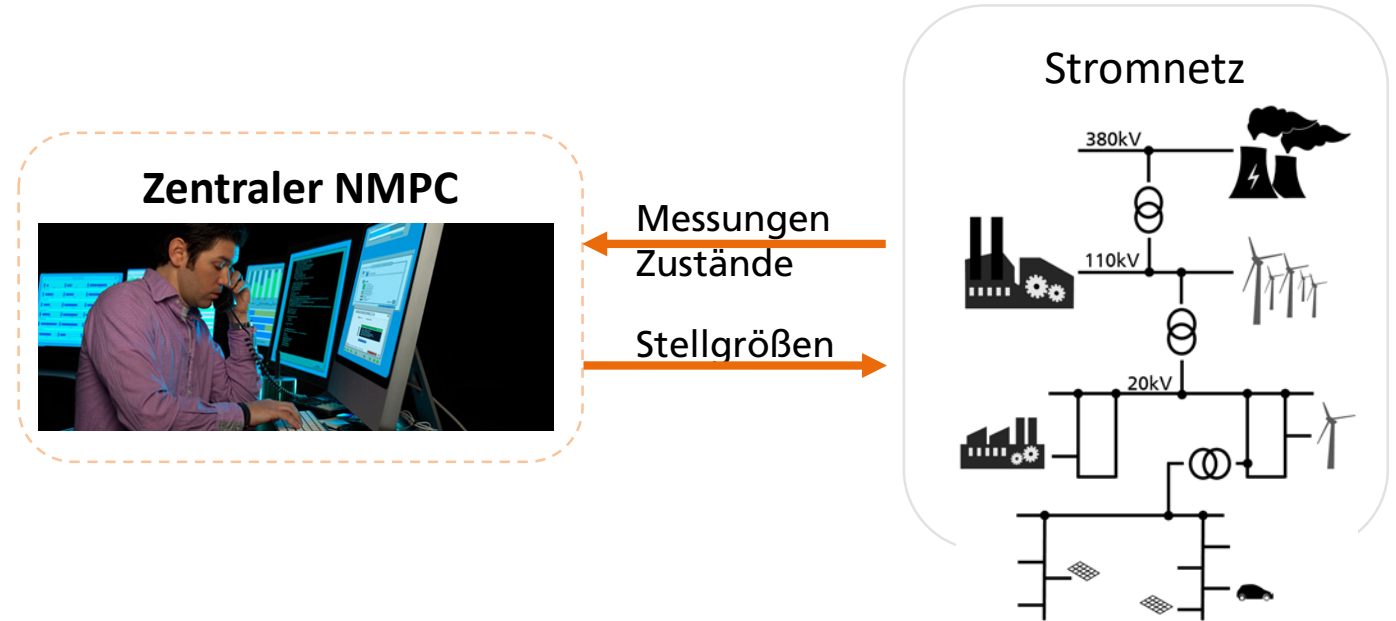
- 1) Mittels DAE
- 2) Algebraische Variablen als stochastischer Prozess

Nichtlineare AEs $g(x_k, u_k) = b$
→ Ersetze F durch

$$F_k = \frac{\partial g(x_k)}{\partial x_k}$$

Zentraler Modellprädiktiver Regler mit nichtlinearem Modell (NMPC)

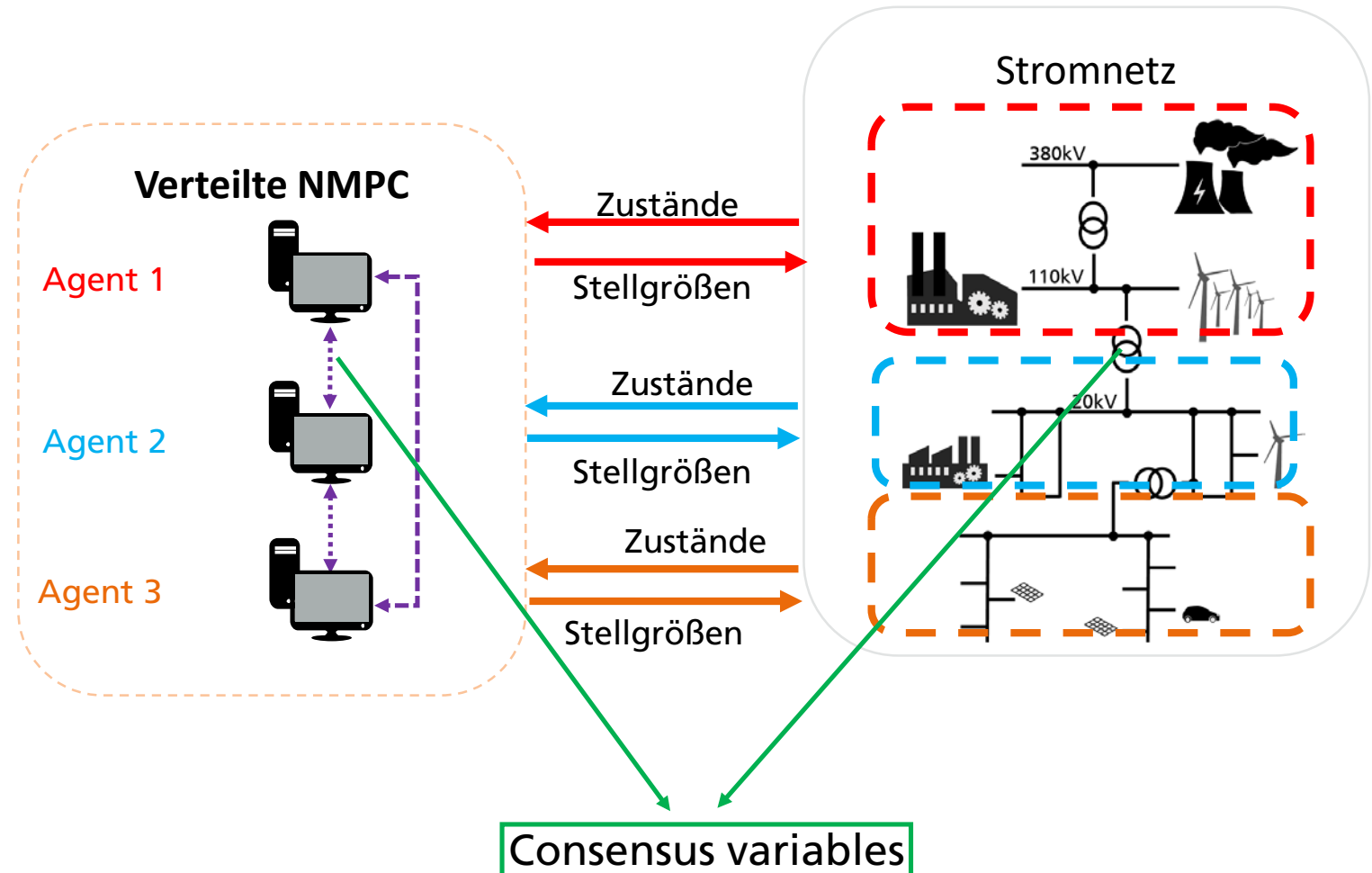
- Bei der zentralen modellprädiktiven Regelung wird die Optimierung für das Gesamtsystem durchgeführt.
- Die Modellierung des Stromnetzes kann als nichtlineares Differentialalgebraisches Zustandsraumsystem erfolgen, dass je nach Fragestellung weiter linearisiert werden kann.
- Die Anfangswerte für Zustände in jedem Zeitschritt können entweder direkt gemessen oder mit einem Zustandsschätzer bestimmt werden.



MathEnergy: Verteilte Modellprädiktive Regelung

Bei der verteilten Modellprädiktiven Regelung (DMPC) wird das System (Stromnetz) in verschiedene Teilsysteme z.B. Netzebenen oder Teilnetze einer Spannungsebene zerlegt.

- Die Regler der Teilnetze kommunizieren untereinander.
- Iterative Lösungsansätze (lokal $\Leftrightarrow$ zentraler Austausch von Informationen)
MathEnergy: ADMM
- Je nach DMPC Strategie konvergiert die Gesamtlösung gegen die Lösung eines zentralen MPC Regler



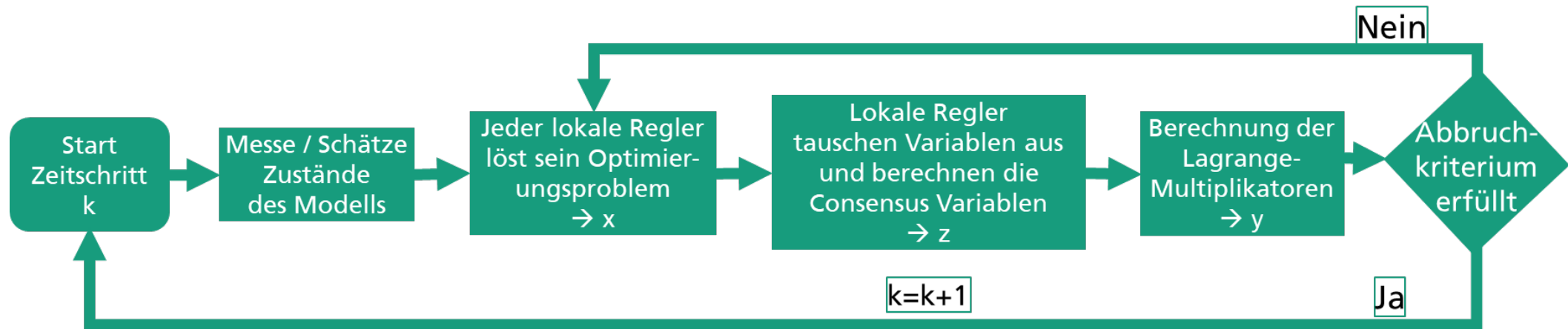
Verteilte Modellprädiktive Regelung

Algorithmus Consensus ADMM (Boyd2011)

Als Basis für den verteilten Regelalgorithmus wurde ADMM von Boyd 2011 verwendet.

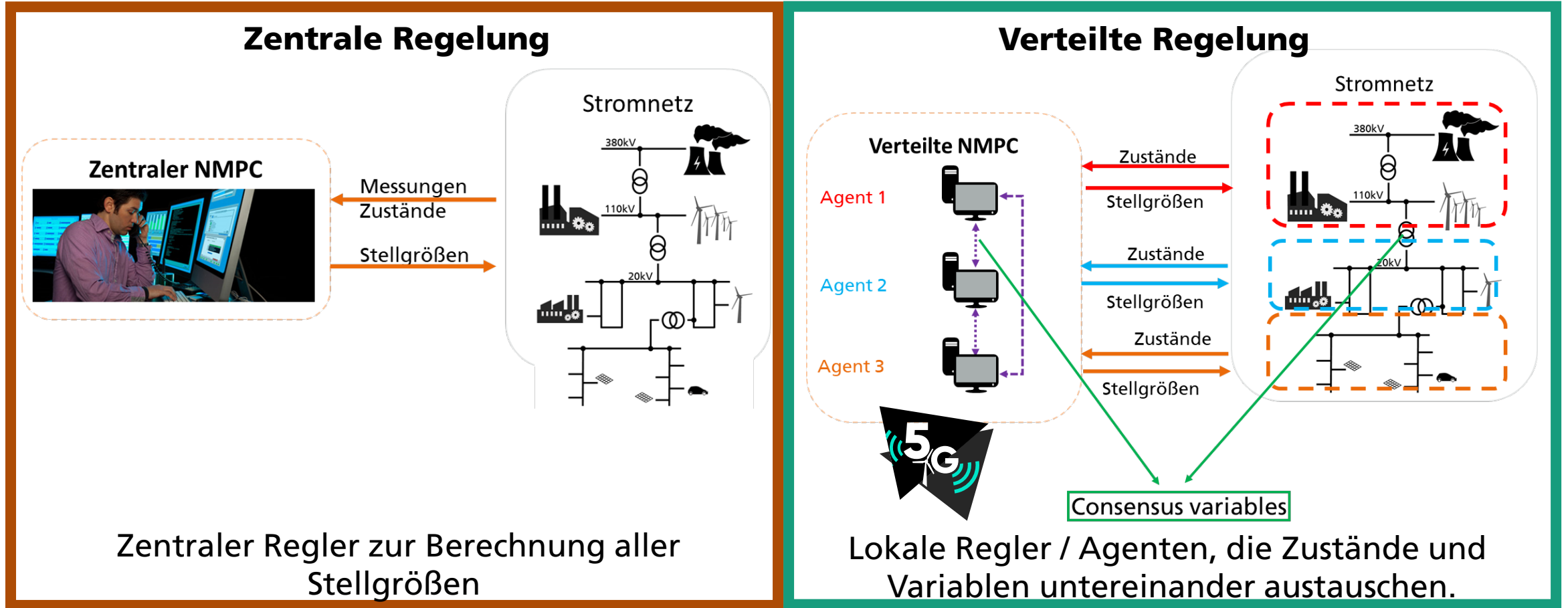
Die wesentlichen ADMM-Schritte sind:

1. Jeder Agent löst sein lokales MPC Problem mit einem festen Wert für die Konsens- und Dualvariablen
2. Die Agenten tauschen Verbindungsinformationen aus und berechnen den neuen Wert der Konsensvariablen z .
3. Jeder Agent berechnet den neuen Wert der dualen Variablen y
4. Der Konsens ist erreicht, wenn sich die Dualvariablen nicht mehr ändern.



MathEnergy - Zentrales und verteiltes (N)MPC mit Zustandsschätzung

Vergleich Zentrale und verteilte Regelung



MathEnergy Demonstrator WSCC 9 Bus-Benchmark

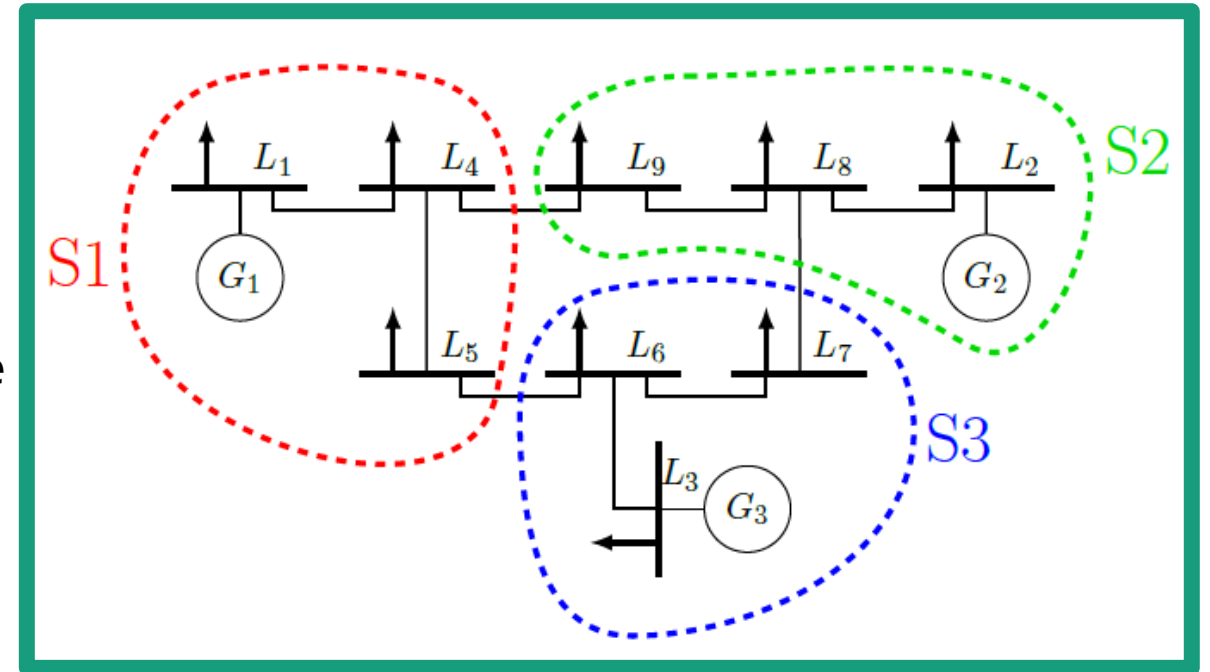
Verteilte Modellprädiktive Regelung

- Modellierung (siehe Wang2015 / Anderson2003)
 - Nichtlineare Netzmodellierung und Parametrierung nach Anderson 2003 → nichtlineare DAE
 - Reduktion der Netzwerkmatrix in jedem Zeitschritt
- Zustandsschätzung
 - Constrained Extended Kalman-Filter
 - Messgrößen: Winkel, i_d, i_q , Leistung der Generatoren
- Regelung
 - Zentrale Modellprädiktive Regelung
Prädiktionshorizont 30 Schritte
 - Stellgrößen: Mechanische Momente und Erregerspannungen der Generatoren G1-G3
 - Zielsollgrößen: Frequenzabweichung, Spannungen

MathEnergy Demonstrator WSCC 9 Bus-Benchmark

Verteilte Modellprädiktive Regelung

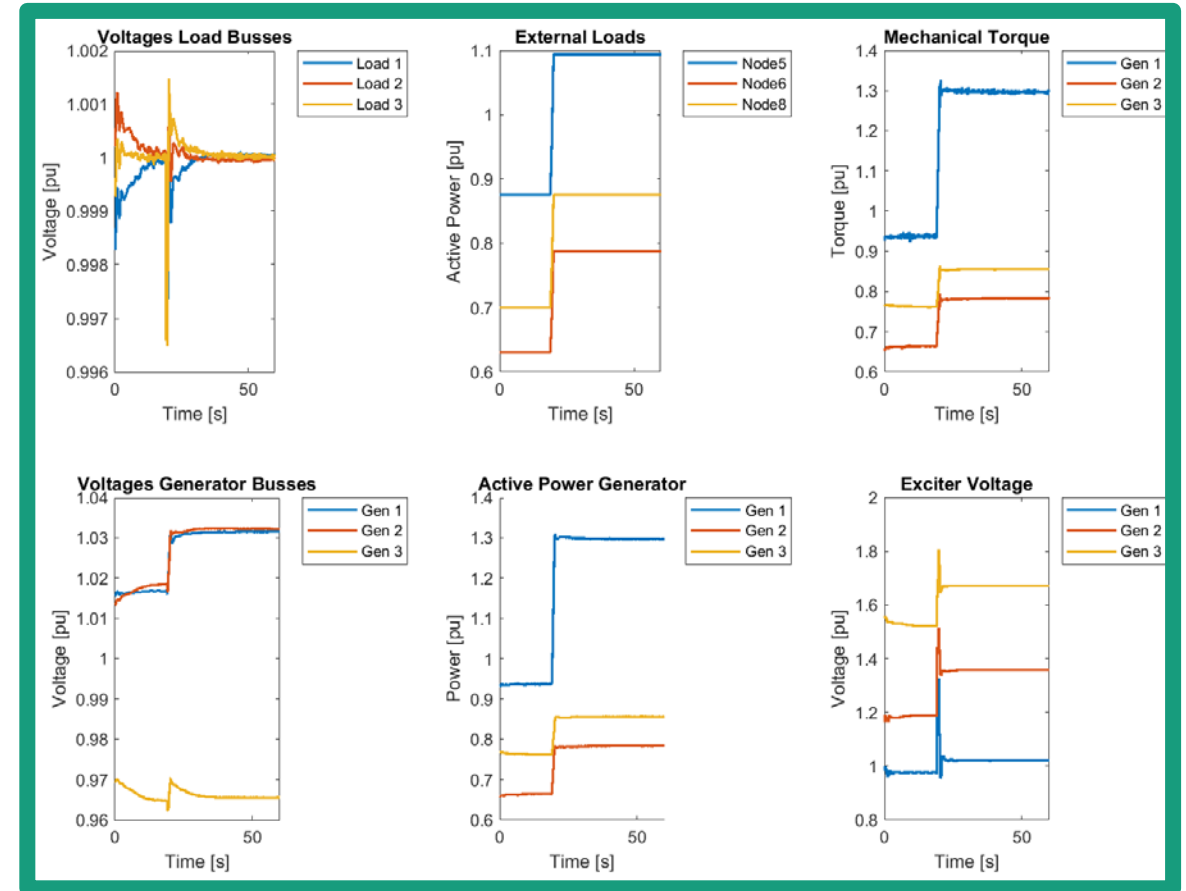
- Das Netzmodell wurde in drei Segmente unterteilt.
- Für jedes Segment wurde ein lokaler Regler zur Spannungs- und Frequenzstabilisierung entwickelt.
 - Die Regler erhalten in jedem Zeitschritt die geschätzten Zustände als Startwert.
 - Die Ergebnisse der Optimierung bzgl. unterschiedlichen Parametrierungen wurden untersucht.
 - Nebenbedingungen an die Änderung der Stellgrößen in jedem Zeitschritt wurden integriert.



MathEnergy Demonstrator WSCC 9 Bus-Benchmark

Verteilte Modellprädiktive Regelung mit CEKF Zustandsschätzung und OHNE Kenntnis der Laständerung nach 19 Sekunden

- Der Anfangszustand für die Modellprädiktive Regelung war nicht exakt bekannt, d.h. die Stellgrößen mussten auch hier zunächst optimiert werden.
- Die Abbildung zeigt, dass die Regelung die Spannungsabweichung sowohl beim Start als auch bei unbekannter Laständerung nach 19s minimiert
- Die Stellgrößen des Reglers (Moment und Erregerspannung) werden vom Regler in jedem Zeitschritt unter Berücksichtigung der aktuellen Zustände bestimmt.

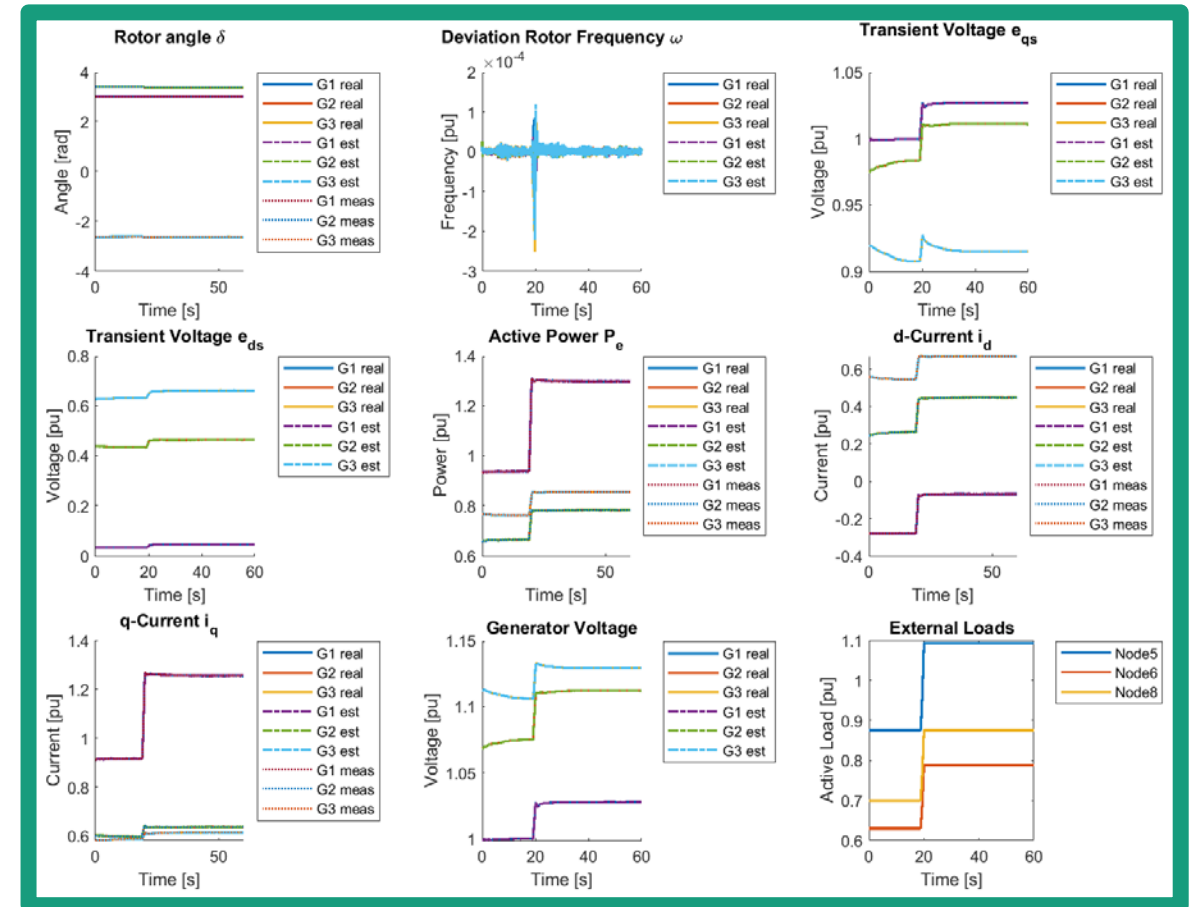


- Bin Wang and Kai Sun. 'Power System Differential-Algebraic Equations'. In: CoRR (2015). url: <http://arxiv.org/abs/1512.05185> (last visited on 05/10/2020).
- P.M. Anderson, A.A. Fouad: Power System Control and Stability, Wiley, 2003

MathEnergy Demonstrator WSCC 9 Bus-Benchmark

Verteilte Modellprädiktive Regelung mit CEKF Zustandsschätzung und OHNE Kenntnis der Laständerung nach 19 Sekunden

- Die Abbildung zeigt, dass die Regelung die Frequenzabweichung zur Netzfrequenz sowohl beim Start als auch bei unbekannter Laständerung nach 19s minimiert
- Die fehlenden Zustände werden durch den CEKF gut geschätzt.
- Die anderen Größen der Generatoren werden durch die Regelung entsprechend den Lastanforderungen, ohne diese vorab zu kennen, angepasst.



- Bin Wang and Kai Sun. 'Power System Differential-Algebraic Equations'. In: CoRR (2015). url: <http://arxiv.org/abs/1512.05185> (last visited on 05/10/2020).
- P.M. Anderson, A.A. Fouad: Power System Control and Stability, Wiley, 2003