



# Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Automation und Angewandte Informatik
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Veit Hagenmeyer
Verbund:	Modellierung, Optimierung und Regelung von Netzwerken heterogener Energiesysteme mit volatiler erneuerbarer Energieerzeugung (MOReNet)
Thema:	Teilprojekt 4: Entwicklung mathematischer Methoden, die eine integrierte, effiziente und echtzeitfähige Optimalsteuerung erlauben

## Zusammenfassung

Das Projekt hat das Ziel, eine echtzeitfähige Lösung für Optimierungsprobleme im Bereich Redispatch von Kraftwerken zu entwickeln, wobei sowohl stochastische Unsicherheiten als auch Aspekte der verteilten Implementierung berücksichtigt werden. Die entwickelten Verfahren werden an realistischen Netzmodellen evaluiert, um ihre Anwendbarkeit im laufenden Netzbetrieb zu gewährleisten. Es gab Verzögerungen im Projektfortschritt aufgrund des Ausscheidens von Projektmitarbeitern und der Corona-Pandemie, welche durch kostenneutrale Verlängerungen inhaltlich kompensiert werden konnten. Im Rahmen des Projekts wurde ein öffentlich zugängliches Softwarepaket „rapidPF“ entwickelt, welches verschiedene Matpower-Case-Dateien kombiniert. Dadurch wird ermöglicht, die verteilten Lastflussprobleme als Optimale Lastflussprobleme zu formulieren und strukturiert mit modernsten Methoden zu lösen. Die entwickelten Methoden sind nicht spezifisch für einen Netzbetreiber, sondern können auch auf andere übertragen werden. Bei der Validierung mit verschiedenen Praxisaufgaben wurde eine Lösung für die Industrie bereitgestellt, für die es keine sofort verfügbaren Antworten gab. Die Forschungsergebnisse des MOReNet-Projekts könnten als Schlüsseltechnologie für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie weiterentwickelt werden und sind von großem Interesse für den Industriepartner TransnetBW und andere Einrichtungen.

# Bericht

## 1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt zielt darauf ab, eine echtzeitfähige Lösung für quasi-stationäre und dynamische Optimierungsprobleme im Bereich Redispatch von Kraftwerken zu entwickeln. Hierbei werden sowohl stochastische Unsicherheiten als auch Aspekte der verteilten Implementierung berücksichtigt. Dabei wird die Formulierung von Optimalsteuerungsproblemen unter Berücksichtigung von technischen Restriktionen und Unsicherheiten angestrebt (WP1). Um Lastflussgleichungen und Konvergenzgarantien sicherzustellen, werden schnelle Echtzeititerationen und numerische Dekompositionsansätze untersucht (WP2). Des Weiteren werden die stochastischen Unsicherheiten, die sich aus der intrinsischen Volatilität des Energieverbrauchs und der erneuerbaren Erzeugung ergeben, berücksichtigt (WP3). Schließlich werden die entwickelten Verfahren an realistischen Netzmodellen evaluiert, um ihre Anwendbarkeit im laufenden Netzbetrieb zu gewährleisten (WP4). Dabei wird auch die Skalierbarkeit für eine breitere Anwendung im Netz untersucht.

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Es handelt sich um den wissenschaftlichen und technischen Stand bei der Optimierung des Betriebs von elektrischen Energienetzen durch Netzbetreiber wie TransnetBW. Die Herausforderungen liegen in der Größe des Problems, der Berücksichtigung unsicherer Parameter und der Behandlung nicht-konvexer Terme sowie diskreter Entscheidungsgrößen, die in Echtzeit innerhalb weniger Minuten gelöst werden müssen, um die Restriktionen an den Leistungsfluss im Netz zu erfüllen. In der industriellen Praxis wird auf der Ebene des Redispatch ein konvexes Optimierungsproblem formuliert, welches jedoch nur unter stark vereinfachenden Annahmen funktioniert. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit der Berücksichtigung nicht-konvexer quasi-stationärer Problemformulierungen und der semi-definiten Relaxation derselben, wobei verteilte Multi-Agenten-Ansätze als Lösungsmöglichkeit diskutiert werden.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Im Jahr 2019 gab es einen Verzug im Projektfortschritt aufgrund des vorzeitigen Ausscheidens des Postdoc Herrn Dr. Dong Xue. Im Jahr 2020 wurde das Projekt erfolgreich vorangetrieben, jedoch verließ Herr Alexander Engelmann das KIT im Laufe des Jahres. Aufgrund der Corona-Pandemie konnte das Projekt nicht Vollzeit weiterbearbeitet werden, jedoch wurde eine Masterarbeit mit Herrn Xinliang Dai begonnen und später von Herrn Tillmann Mühlpfordt und Herrn Professor Veit Hagenmeyer betreut. Dies führte zu einer erfolgreichen Veröffentlichung. Trotzdem kam es durch alle Umstände zu einer weiteren Verzögerung, die zu einer genehmigten kostenneutralen Verlängerung des Projektes führte. Daraufhin arbeitete Herr Xinliang Dai als Doktorand an dem Projekt und das Projekt blieb im Zeitplan bezüglich der genehmigten kostenneutralen Verlängerung.

Zudem bestand ein enger Schnittstellen-Austausch mit den Partnern vom IWR (Prof. Kostina) für das WP2 T2 & TP3: das Know-how des IAI im Bereich Lastflussgleichungen ermöglichte dem IWR, die entsprechend in WP2 T2 & TP3 benötigten Gleichungen für die Echtzeitoptimierung erfolgreich zu erstellen. Das IWR wiederum beriet das IAI intensiv bzgl. verschiedenster Optimierungsverfahren, sodass das IAI die verteilten Lastflussprobleme überhaupt in angemessener Zeit numerisch lösen konnte.

**Planung**

	2018		2019	
	1	12	1	12
WP1				
WP2				
WP3				
WP4				

**Ablauf**

	2018		2019		2020		2021		2022	
	1	12	1	12	1	12	1	12	1	6
WP1										
WP2										
WP3										
WP4										

#### 4 Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z. B. Investitionen, Personalmittel)

Die Ausgaben für das Projekt umfassten Personalkosten für die beteiligten Wissenschaftler Herrn Dr. Xue Dong, Herrn Alexander Engelmann und Herrn Xinliang Dai. Die Arbeiten wurden unter der Anleitung von Herrn Dr. Timm Faulwasser und nach Wechsel von Herrn Faulwasser an die Universität Dortmund unter der Anleitung von Professor Veit Hagenmeyer durchgeführt. Aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie wurde auf Reisen weitestgehend verzichtet. Die Mittel für Reisen und Konferenzen wurden nicht wie geplant verausgabt. Die erhöhten Personalkosten sind durch die erforderliche zusätzliche Einarbeitungszeit nach den Personalwechseln begründet.

#### 5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

##### WP1 Problemspezifische Formulierung von Optimalen Lastflussproblemen

Das Ziel der Arbeit war es, geeignete und problemadäquate Formulierungen zur Lösung von Anwendungsproblemen mittels numerischer Optimierung zu finden. Die Ergebnisse der Arbeit sind vielversprechend. Basierend auf grundlegenden Arbeiten wurde das Softwarepaket „Rapid Prototyping for Distributed Power Flow Problems (rapidPF)“ entwickelt, das verteilte Lastflussprobleme als Optimierungsproblem formuliert und strukturiert mit modernsten Methoden löst. Der Softwarepaket ist ein wichtiger Beitrag zum Fortschritt in diesem Bereich und wird voraussichtlich auch in Zukunft von großem Interesse sein.

##### WP2 Schnelle Echtzeititerationen für quasi-stationäre Redispatchprobleme

Das Ziel ist es, die Leistungsbilanz einzuhalten und die Lastflussgleichungen zu erfüllen, während die Echtzeitfähigkeit sichergestellt wird. Dafür werden die am IWR entwickelten Verfahren für Echtzeititerationen untersucht sowie numerische Dekompositionsansätze zur Lösung von nichtkonvexen Optimierungsproblemen eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe des Softwarepakets „rapidPF“ eine reduzierte Modellierungsmethode und ein (quasi-)Gauß-Newton verteilter Algorithmus entwickelt wurden, die die Größe von Lastflussproblemen erheblich reduzieren und die Rechenzeit auf unter eine Sekunde verkürzen. Dadurch ist es nun möglich, Lastflussprobleme realistischer Größe für Echtzeitberechnungen von Systembetreibern zu lösen.

##### WP3 Effiziente Berücksichtigung von stochastischen Unsicherheiten

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, unsichere Prognosen der elektrischen Last und der erneuerbaren Erzeugung zu berücksichtigen, da diese zu erheblichen Mehrkosten im Betrieb von Energiesystemen füh-

ren. Dazu werden Methoden des polynomialen Chaos zur Propagation von Unsicherheiten auf die betrachteten Probleme angewendet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass intrusive polynomiale Chaos-Erweiterungsansätze numerische Vorteile bei Lastflussproblemen bieten. Zudem wurden nicht-intrusive polynomiale Chaos-Erweiterungsansätze für Lastflussprobleme untersucht. Es wurden zeitlich korrelierte Unsicherheiten im Sinne von Gauß-Prozessen untersucht und effiziente Berücksichtigung von stochastischen Unsicherheiten durch die Verwendung von verteilten Energiespeichern und einem kompakten, dynamischen, stochastischen, „chance-constrained“ - optimalen Lastfluss (CC-OPF) erreicht. Das verteilte Energiespeichersystem führt zu einem stabileren Betrieb mit abgeflachten Erzeugungsprofilen, geringer Unsicherheit an den Erzeugern und reduzierten Erzeugungskosten.

#### WP4 Erprobung der entwickelten Verfahren an typischen Praxisaufgaben

Das Ziel dieser Forschungsarbeit liegt in der Entwicklung von Methoden, die prototypisch für realistische Netzmodelle, Datensätze und Unsicherheitsszenarien implementiert und evaluiert werden können. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die entwickelten Methoden erfolgreich mit verschiedenen Praxisaufgaben sowie einem vereinfachten Übertragungsnetz in Baden-Württemberg, das von dem Industriepartner TransnetBW betrieben wird, getestet und validiert wurden. Die Methoden wurden auf Benutzerfreundlichkeit, Transparenz, Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit getestet, um eine schnelle und zuverlässige Anwendung zu ermöglichen.

### **6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Forschungsarbeit zwischen TransnetBW und dem KIT-IAI konzentrierte sich darauf, Methoden zur Wiederverwendbarkeit, Benutzerfreundlichkeit, Transparenz und Reproduzierbarkeit zu entwickeln, um eine schnelle und zuverlässige Nachvollziehbarkeit zu ermöglichen. Dazu sind die entwickelten Softwarepakete sowie Methoden nicht spezifisch für einen Netzbetreiber, sondern können auch auf andere Netzbetreiber übertragen werden. Bei der Validierung mit verschiedenen Praxisaufgaben wurde eine Lösung für die Industrie bereitgestellt, für die es keine sofort verfügbaren Antworten gab.

### **7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Forschungsergebnisse des MORENet-Projekts könnten als Schlüsseltechnologie für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie weiterentwickelt werden, und sind von großem Interesse für den Industriepartner TransnetBW und andere Einrichtungen wie Hitachi ABB Power Grids. Es gibt realistische wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende und die Ergebnisse könnten auch für andere Netzbetreiber von Nutzen sein. Eine Möglichkeit der konkreten Nutzung der Ergebnisse ist das öffentlich zugängliche Softwarepaket „Rapid prototyping for distributed power flow problems (rapidPF)“ für verteilte optimale Lastflussprobleme. Die Zusammenarbeit mit der TransnetBW haben bereits zu neuen Projekten und Kooperationen geführt, z.B. die Forschungsarbeit am Shapely-Algorithmus, mit dem die Kosten der verteilten Berechnung fair aufgeteilt werden und die Privatsphäre der verschiedenen Netzbetreiber bewahrt wird, indem der verteilte Algorithmus des MORENet-Projekts verwendet wird. Diese Forschungsergebnisse bieten Anlass für weitere wissenschaftliche Fragestellungen.

### **8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Keine.

## 9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### 9.1 Referierte Publikationen (z. B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

Faulwasser, T., Engelmann, A., Mühlpfordt, T., & Hagenmeyer, V. (2018). Optimal power flow: an introduction to predictive, distributed and stochastic control challenges, at - Automatisierungstechnik, 66(7), 573-589. doi: <https://doi.org/10.1515/auto-2018-0040>

Du, X., Engelmann, A., Jiang, Y., Faulwasser, T., & Houska, B. (2019). Distributed State Estimation for AC Power Systems using Gauss-Newton ALADIN. Proc. IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC), pp. 1919 – 1924.

Mühlpfordt, T., Dai, X., Engelmann, A., & Hagenmeyer, V. (2021). Distributed power flow and distributed optimization–formulation, solution, and open source implementation. Sustainable Energy, Grids and Networks, pp.100471. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100471>

Dai, X., Cai, Y., Jiang, Y., & Hagenmeyer, V. (2022). Rapid Scalable Distributed Power Flow with Open-Source Implementation. 9th IFAC Conference on Networked Systems NECSYS 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.250>

Zhai, J., Dai, X., Jiang, Y., Xue Y., Hagenmeyer, V., Jones, C., & Zhang Xiao-Ping (2022). Distributed Optimal Power Flow for VSC-MTDC Meshed AC/DC Grids Using ALADIN – IEEE Transactions on Power Systems. Doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3155866>

Bauer, R., Mühlpfordt, T., Ludwig, N., & Hagenmeyer, V. (2022). Analytical uncertainty propagation and storage usage in a high RES Turkish transmission grid scenario. Thirteenth ACM International Conference on Future Energy Systems (pp. 489-495).

Bauer, R., Mühlpfordt, T., Ludwig, N., & Hagenmeyer, V. (2023). Analytical uncertainty propagation for multi-period stochastic optimal power flow. Sustainable Energy, Grids and Networks, 33, 100969.

### 9.2 Andere Veröffentlichungen (z. B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

Dai, X., Hagenmeyer, V. (2023). Towards Rapid Large-Scale Distributed Optimal Power Flow.

Dai, X., Y., Jiang, Lian, Z., Y., Jones, C., & Hagenmeyer, V. (2023). Hypergraph based Distributed Sequential Quadratic Programming for PF Problems

### 9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

Mühlpfordt, T. (2020) Uncertainty Quantification via Polynomial Chaos Expansion – Methods and Applications for Optimization of Power Systems. PhD Thesis, KIT open.

Dai, X. (2021). Solving Distributed Power Flow by Distributed Optimization. Master Thesis, KIT open.

## Kurzbericht

- öffentlich -

Zuwendungsempfänger:	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Automation und Angewandte Informatik
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Veit Hagenmeyer
Verbund:	Modellierung, Optimierung und Regelung von Netzwerken heterogener Energiesysteme mit volatiler erneuerbarer Energieerzeugung (MORENet)
Thema:	Teilprojekt 4: Entwicklung mathematischer Methoden, die eine integrierte, effiziente und echtzeitfähige Optimalsteuerung erlauben

### 1. Ziel und Inhalt des Projektes

Das Projektziel des Teilprojekts KIT ist eine echtzeitfähige Lösung von Optimierungsproblemen für den Redispatch von Kraftwerken, die stochastische Unsicherheiten und Aspekte der verteilten Implementierung berücksichtigt. Die Probleme werden als Optimale Lastflussprobleme formuliert und es werden Verfahren für schnelle Echtzeititerationen und Dekompositionsansätze zur Lösung nichtkonvexer, kontinuierlicher Optimierungsprobleme eingesetzt. Darüber hinaus werden die stochastischen Unsicherheiten, die sich aus der intrinsischen Volatilität des Energieverbrauchs und der erneuerbaren Erzeugung ergeben, berücksichtigt. Die entwickelten Methoden werden an typischen Praxisaufgaben erprobt.

### 2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Die Forschungsarbeit, die im Rahmen des MORENet-Projekts von der TransnetBW und dem KIT-IAI durchgeführt wurde, wurde von verschiedenen Forschern geleitet. Aufgrund des Ausscheidens von Projektmitarbeitern sowie der Corona-Pandemie gab es eine genehmigte kostenneutrale Verlängerung. Dennoch konnte ein öffentlich zugängliches Softwarepaket „rapidPF“ entwickelt werden, welches verschiedene Matpower-Casefiles kombiniert. Dadurch wird ermöglicht, die verteilten Lastflussprobleme als Optimale Lastflussprobleme zu formulieren und strukturiert mit modernsten Methoden zu lösen. Die entwickelten Methoden sind nicht spezifisch für einen Netzbetreiber, sondern können auch auf andere übertragen werden. Dabei wurden die Aspekte Wiederverwendbarkeit, Benutzerfreundlichkeit, Transparenz und Reproduzierbarkeit berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben die Ziele erfüllt und werden von der TransnetBW und anderen Interessensgruppen äußerst positiv aufgenommen.

### **3. Konkreter Nutzen sowie Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse**

Der Industriepartner TransnetBW zeigt großes Interesse an den gewonnenen Forschungsergebnissen. Zudem arbeitet das Unternehmen an einem verteilten Shapely-Algorithmus, mit dem die Kosten der verteilten Berechnung fair aufgeteilt werden und die Privatsphäre der verschiedenen Netzbetreiber bewahrt wird. Dabei soll der verteilte Algorithmus des MORENet-Projekts eingesetzt werden. Auch andere Einrichtungen wie beispielsweise Hitachi ABB Power Grids haben Interesse an einer Zusammenarbeit bekundet und forschen ebenfalls an der Lösung groß angelegter optimaler Lastflussprobleme unter Verwendung des verteilten ALADIN-Algorithmus. Aufgrund seines Potenzials, die mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung (MSO) als Schlüsseltechnologie für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie weiterzuentwickeln und sichtbar zu machen, kann das Projekt als wegweisend betrachtet werden. Darüber hinaus sind sowohl die EPFL Lausanne als auch State Grid China auf unsere Forschungsarbeiten aufmerksam geworden und bekunden ihr Interesse an weiteren Kooperationen in der Zukunft.