Jülich, 29.6.2024

Autor: Dirk Witthaut

Schlussbericht zum Projekt

GRaph ALgorithms for electricity and multi-energy networks (GRAL-Networks)

Forschungszentrum Jülich
Institute of Climate and Energy Systems:
Energy Systems Engineering (ICE-1)

Förderkennzeichen: 03SF0751

Projektlaufzeit: 1.3.2024 - 31.12.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Teil III: Erfolgskontrollbericht

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens: geförderte Arbeitspakete

AP1: Strukturelle Stabilität und Instandhaltungsplanung

Ausfallrechnung

Die inhaltlichen Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind in Teil II dargestellt.

Auf der Grundlage dieses Arbeitspakets konnten wir eine Kooperation mit den Übertragungsnetzbetreibern 50Hertz und TenneT etablieren. Langfristig sollen die entwickelten Verfahren in der Topologieoptimierung bei 50Hertz eingesetzt werden.

Ein erstes gemeinsames Manuskript wurde zur Veröffentlichung eingereicht [1]. Ein weiteres Manuskript wird derzeit finalisiert und soll demnächst zur Veröffentlichung im Rahmen der Power Systems Computing Conference PSCC (2026) eingereicht werden. Der Abstract wurde akzeptiert und wir wurden zur Einreichung eines Artikels bis Oktober 2026 aufgefordert.

Verfahren zur schnellen Lösung der AC-Lastflussgleichungen

Die inhaltlichen Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind in Teil II dargestellt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse und Ideen aus diesem Arbeitspaket wurde eine Kooperation mit dem Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz etabliert. Während im Projekt GRAL-Networks wesentliche mathematische Ideen entwickelt wurden, fokussiert sich die Kooperation auf die Umsetzung in Software für GPUs. Langfristig soll diese Software in der Topologieoptimierung bei 50Hertz eingesetzt werden.

Die Ergebnisse sollen veröffentlicht werden, sobald eine erste Version der GPU-Software fertig gestellt und ausreichend getestet ist.

Quantifizierung von Topologieänderungen zur Bewertung der Netzsicherheit

Die inhaltlichen Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind in Teil II dargestellt.

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurden die mathematischen Grundlagen erfolgreich erarbeitet und eine Kooperation mit dem Übertragungsnetzbetreiber Amprion etabliert. Nach der Projektlaufzeit werden die Forschungsarbeiten weitergeführt, um die Methoden in Software umzusetzen und zu testen.

Eine Veröffentlichung im Rahmen der nächsten Power Systems Computing Conference PSCC 2026 wird angestrebt. Der Abstract wurde akzeptiert und wir wurden zur Einreichung eines Artikels bis Oktober 2026 aufgefordert.

AP2: Stabilitätskriterien für die Spannungsdynamik

Winkel- und Spannungsstabilität in den Lastflussgleichungen

Die inhaltlichen Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind in Teil II dargestellt.

Es wurden wichtige mathematische Ergebnisse erzielt, die von erheblichem praktischen Nutzen sein können. Ein erstes Manuskript [2] wurde zur Veröffentlichung eingereicht. Wir verfolgen diesen Fragestellungen in weiteren Forschungsarbeiten.

Lineare Stabilität in dynamischen Modellen

Die inhaltlichen Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind in Teil II dargestellt.

Es wurden weitgehende mathematische Ergebnisse zur Spannungsstabilität erarbeitet. Wir verfolgen dieses Thema weiter um eine umfassende Analyse dieser Problemstellung zu erhalten. Wir sind zuversichtlich, dass wir diese umfassende Analyse zeitnah publizieren können.

AP3: Multi-Energie-Netze

Die inhaltlichen Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind in Teil II dargestellt.

Im diesem Arbeitspaket wurden grundlegende Ergebnisse für ein Standard-Modell für optimale Netzwerke erzielt. Ein erstes Manuskript wurde zur Veröffentlichung eingereicht [3]. In Folgearbeiten sollen diese Ergebnisse auf spezifischere Modelle multimodaler Energienetze erweitert werden.

Fortschreibung des Verwertungsplans

Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Das Projekt GRAL-Networks stellt im Wesentlichen Grundlagenforschung dar; es gibt daher keine Erfindungen oder Schutzrechte.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Das Projekt GRAL-Networks stellt im Wesentlichen Grundlagenforschung dar; in diesem Bereich hat es zu wichtigen neuen Erkenntnissen und der Weiterentwicklung wissenschaftlicher Methoden beigetragen.

Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse und mathematischen Erkenntnisse ermöglichen in einem zweiten Schritt die Translation in die industrielle Anwendung. Zu diesem Zweck haben wir Kooperationen mit drei Übertragungsnetzbetreibern aufgebaut: 50Hertz, Tennet und Amprion.

Insbesondere im Bereich der dynamischen Topologieoptimierung gibt es ein großes wirtschaftliches Potential. Durch das Öffnen von Kuppelstellen in Umspannwerken kann die Netztopologie geändert und somit Netzengpässe abgemildert werden. Dies kann zur Reduktion der stetig wachsenden Kosten für Redispatch und Countertrading beitragen. Die Optimierung ist jedoch mathematische höchst anspruchsvoll, hier können die neuen Methoden aus AP1 zum Einsatz kommen.

Weiterhin können die Erkenntnisse aus AP1 die Planung von Wartungsarbeiten verbessern. Auch dies kann zur Vermeidung von Netzengpässen beitragen, zudem kann die Ausfallsicherheit verbessert werden.

Die entwickelten Methoden sollen allen Übertragungsnetzbetreibern zur Verfügung gestellt werden. Somit können im Erfolgsfall alle Verbraucher in Deutschland profitieren.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Trotz der sehr kurzen Projektlaufzeit konnten umfangreiche wissenschaftliche Ergebnisse erzielt werden und es sind bereits mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen entstanden. Bis Juni 2025 wurden im Kontext des Projekts drei Artikel fertig gestellt und zur Veröffentlichung in wissenschaftlichen Fachzeitschriften eingereicht [1, 2] bzw. werden im Laufe des nächsten Monats eingereicht werden [3]. Zudem haben wir Abstracts für zwei Beiträge für die Power Systems Computing Conference (PSCC) 2026 eingereicht. Die PSCC findet nur alle zwei Jahre statt und stellt die zentrale wissenschaftliche Konferenz für unser Forschungsgebiet dar. Die Abstracts der zwei Beträge wurden akzeptiert und wir wurden zur Einreichung eines vollen Artikels aufgefordert.

Die Arbeit an diesem Projekt hat unsere Expertise in Fragen der Versorgungssicherheit und der Stabilität und Sicherheit der Stromnetzes gefestigt. Aufgrund dieser Expertise wurde Herr Prof. Dr. Witthaut wiederholt für Fernsehen, Hörfunk, Zeitungen und Online Medien interviewt:

- NDR-Info (TV), 27.11.2024
- ZDF Wiso (TV), 28.4.2025
- RTL (TV), 28./29.4.2025
- n-tv (TV), 28./29.4.2025
- Hessischer Rundfunk (Radio), 28.4.2025
- Westdeutscher Rundfunk (Radio), 28.4.2025
- Wetzlarer Neueste Nachrichten (Print), 21.5.2025
- Süddeutsche Zeitung (Print & Online):
  https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/stromausfaelle-deutschland-sicherheit-vorsorge-li.3243864
- Redaktionsnetzwerk Deutschland (Online):
  https://www.rnd.de/panorama/trotz-super-blackout-experte-haelt-europas-stromnetz-fuer-sehr-robust-3H7DU4M6RJGNNPFNWMLRQE43VU.html
- Tagesschau.de (Online):
  https://www.tagesschau.de/faktenfinder/kontext/blackout-110.html
- zdfheute.de (Online):
  https://www.zdfheute.de/panorama/blackout-strom-ausfall-deutschland-100.html

Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Alle Arbeitspakete konnten mit sehr gutem Erfolg bearbeitet werden.

Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Zeitplanung wurde eingehalten. Aufgrund der sehr kurzen Projektlaufzeit ist es unumgänglich, dass die Veröffentlichung der Ergebnisse erst nach Ende der Laufzeit erfolgen kann.

Die Ausgabenplanung wurde weitgehend eingehalten. Die geplanten Personalmittel konnten leider nicht vollständig im Jahr 2024 verausgabt werden. Eine Übertragung der Restmittel in das Jahr 2025 war nicht möglich.

Fertiggestellte Manuskripte

[1] van Dijk, J., Westerbeck, N., Schewe, L., Benigni, A. & Witthaut, D. Unified algebraic deviation of distribution factors in linear power flow. *arXiv preprint arXiv:2412.16164* (2024).

[2] Bačić, I., Hartmann, C., Böttcher, P. C. Gross, D., Benigni, A., Witthaut, D. Existence of phase-cohesive solutions of the lossless power flow equations. *Authorea Preprints, DOI:10.36227/techrxiv.174611978.89382822/v1* (2025).

[3] Parameswaran, A., Bačić, I., Benigni, A. & Witthaut, D. Symmetry breaking in minimum dissipation networks. *arXiv preprint arXiv:2505.24818* (2025).

Geplante Beiträge zur PSCC 2026

[4] Schreyer, S., Hunkemöller, M., Lange, J., Bačić, I., Böttcher, P. C., Witthaut, D. & Kruse, J. Attributing the effect of multiple grid topology modifications via Shapley values.

[5] Titz, M., Witthaut, D., van Dijk, J., Petrick, B. & Westerbeck, N. Voltage sensitive distribution factors for contingency analysis and topology optimization