

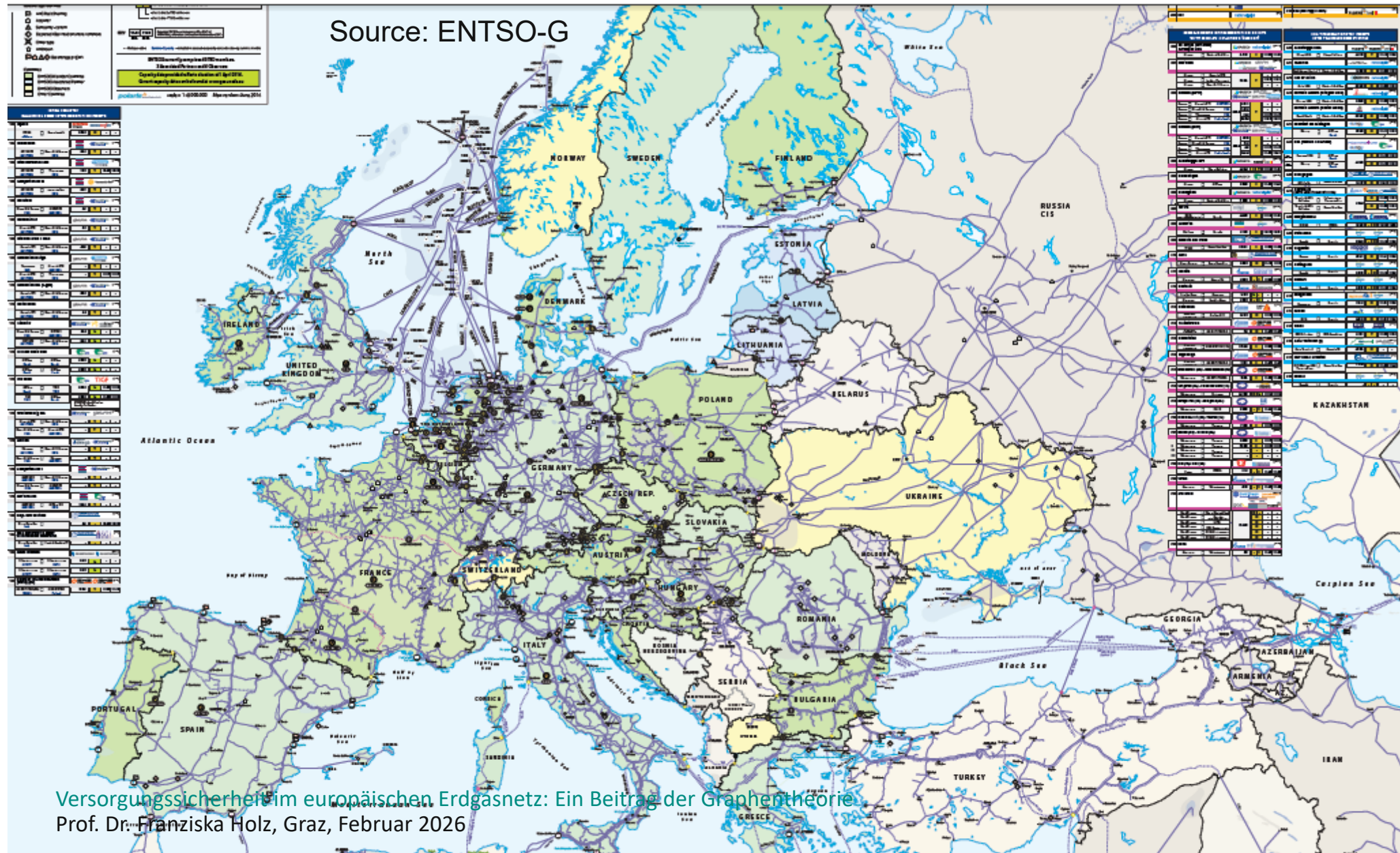
## 19. Symposium Energieinnovation

---

# Versorgungssicherheit im europäischen Erdgasnetz: Ein Beitrag der Graphentheorie

Prof. Dr. Franziska Holz  
Graz im Februar 2025

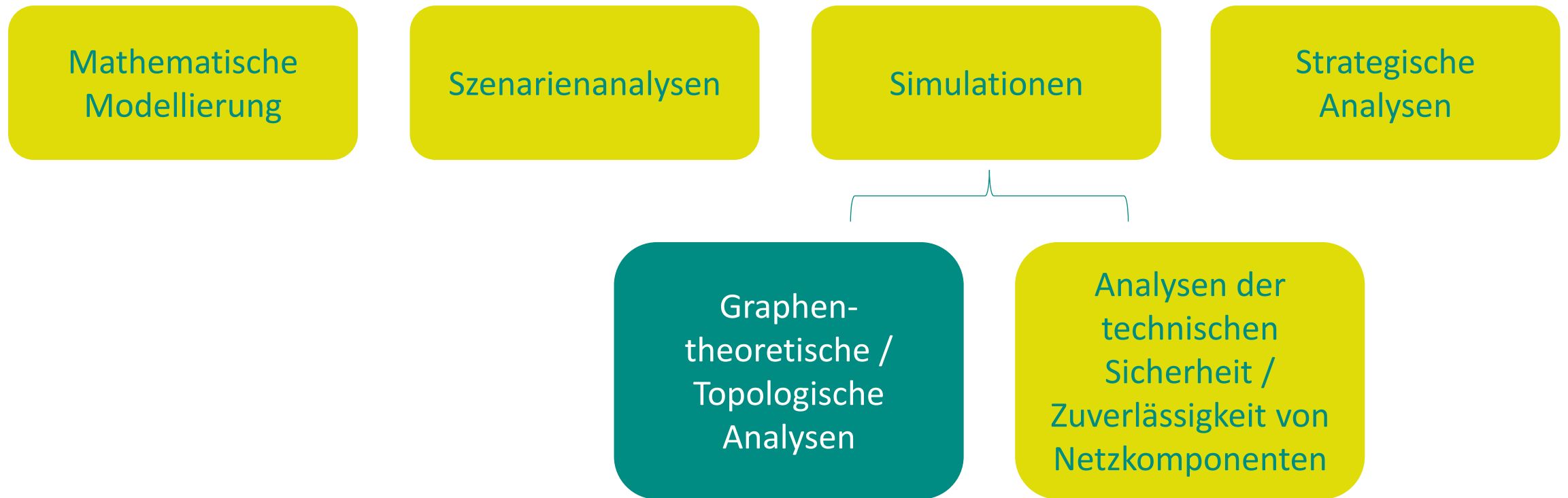
# Dichtes Erdgasnetz in Europa: Seit 2022 im Fokus der Öffentlichkeit



- Pipelines sind üblicherweise an Land (onshore)
  - Europa und Nordamerika sind Pipeline-Märkte im Gassektor, d.h. sehr viele Pipelines
  - Andere Weltregionen haben nur wenige, aber oft wichtige Verbindungs-Pipelines (Interkonnektoren), aber keine Pipeline-Netze (Asien, Südamerika, Naher Osten)
- Offshore-Pipelines (im Meer) sind selten, weil mit höheren Kosten verbunden (Mittelmeer, Schwarzes Meer, Nordsee, Ostsee)
- Verschiedene Druckstufen:
  - Import-Fernleitungen: 16-100 bar
  - Fernleitungen: 1-16 bar
  - Niederdruck (Verteilernetz): < 1bar



Murray et al. (2008, <https://doi.org/10.1111/j.1468-2257.2008.00447.x>) unterscheidet vier verschiedene Arten der techno-ökonomischen Analysen der Versorgungssicherheit:



- Strom: üblicherweise mit sog. synthetischen Netzen
- Wenig Literatur zu Erdgasnetzen:
  - Graphentheoretische Analysen der strukturellen Verbundenheit des (europäischen) Gas-Pipeline-Netzes, insbesondere von Carvalho et al. (2009, <https://doi.org/10.1103/physreve.80.016106>; 2014, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090265>)
  - Netzperformance-Analysen aufbauend auf dem Konzept der Zentralität und für verschiedene Ausfall-Szenarien, z.B. von Li et al. (2021, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.730999>) für ein synthetisches Netz
  - Netzstabilitäts-Index basierend auf dem Max-Flow-Konzept (maximaler Netzdurchfluss), insbesondere von Cai et al. (2021, <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.792410>) für synthetische Typnetze

## A. Zentralitäts-Indikatoren

## B. Netzstabilität (bzw. Verwundbarkeit) aufbauend auf dem maximalen Durchfluss

Grundkonzepte sind in der *Network X* library in Python verfügbar (<https://networkx.org/documentation/stable/index.html>):

- Grad (*degree*)
- Zentralität (*centrality*) → Identifikation von kritischen Komponenten
- Strukturelle Verbundenheit (*connectedness & connectivity*), Erreichbarkeit (*reach*)
- Neu hier: Netz-Zentralitäts-Performance-Index (*Network Centrality Performance Indicator*, NCPI)
- Maximaler Durchfluss (*maximum flow*) im Netz bzw. zwischen Quelle(n) und Senke(n)
- Neu hier: Durchflusskapazitätsindex (*network flow robustness capacity*, NFCR), aufbauend auf Cai et al. (2021)

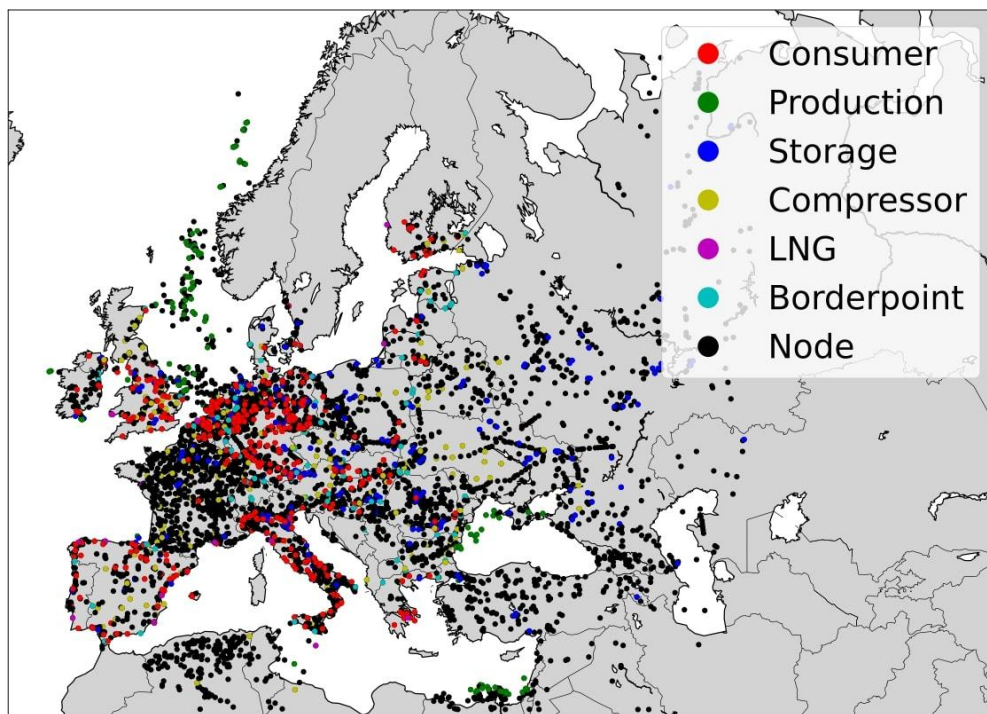
# Entscheidungskriterien für die Ausfall-Simulation von kritischen Netzelementen (Knoten /Kanten)

---

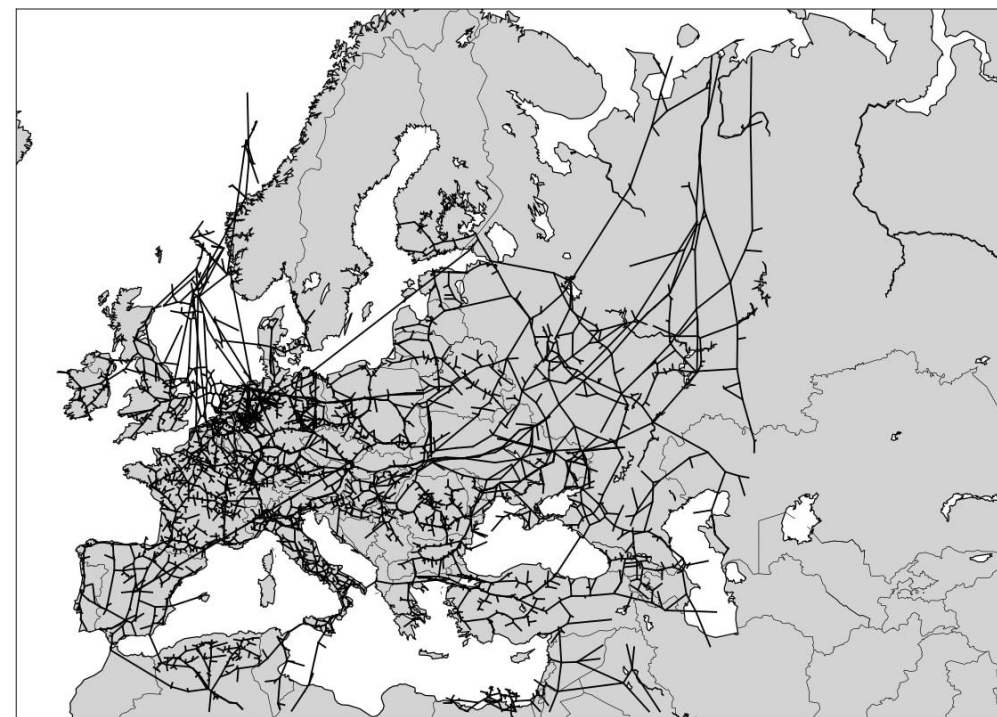
- Zufällige Auswahl
- Auf Basis der Zentralität bzw. eines umfassenden Index bestehend aus Betweenness-Zentralität, Closeness-Zentralität und Knoten-Degree-Zentralität  
→ **Stark vernetzte Knoten/Kanten prioritär entfernen**
- Auf Basis des maximalen Durchflusses: Index aus Flusskapazität (*flow capacity rate*, FCR), Fluss-Zentralität (*flow centrality*, FC) und gewichteter Durchflusskapazität (*weighted flow capacity rate*, WFCR) à la Nicholson et al. (2016)  
→ **Knoten bzw. Kanten, die den maximalen Durchfluss stark beeinflussen prioritär entfernen**

# Gas-Pipeline-Netz in Europa (2020) im Scigrid\_gas Datensatz

4765 Knoten, 6012 Kanten (Pipeline-Segmente), 55 Länder



Netzknoten (mit verschiedenen Funktionen)

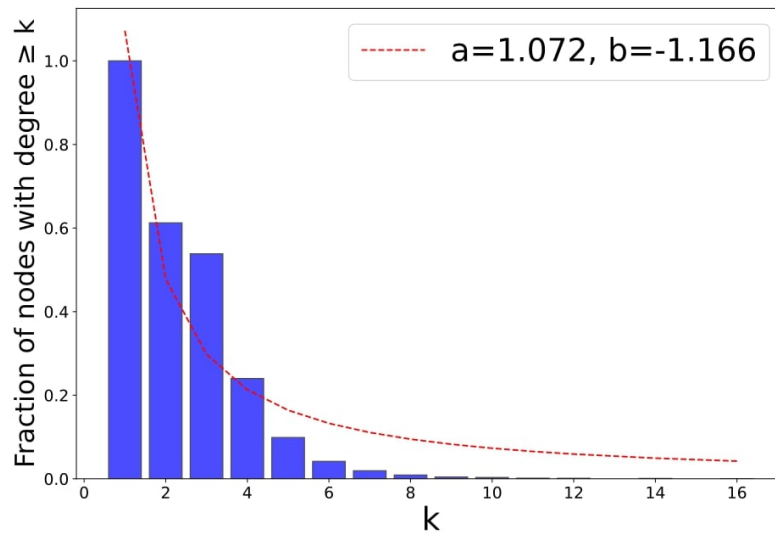


Netzkanten (Pipelines)

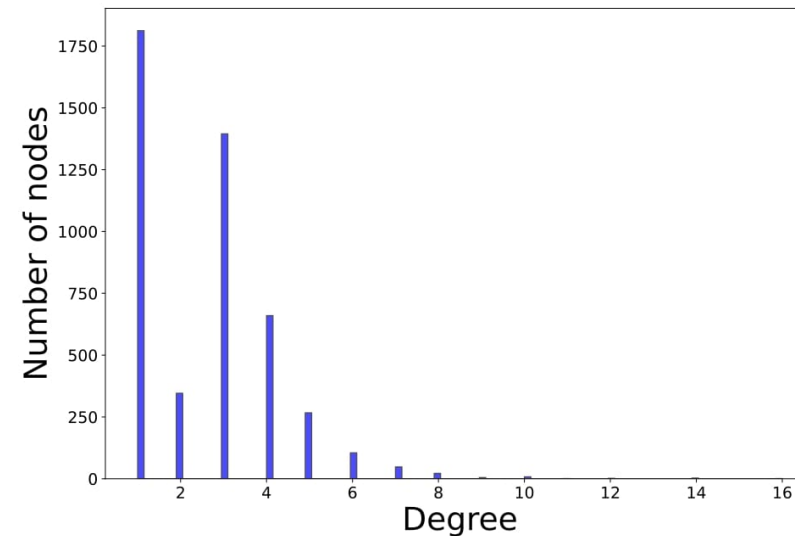
Source: Own depiction, based on IGGIELGN data set (after dataset corrections, incl. matching to countries of all nodes and aggregating parallel edges), ([https://www.gas.scigrid.de/posts/2020-Sep-02\\_iggielgn.html](https://www.gas.scigrid.de/posts/2020-Sep-02_iggielgn.html))

# Das europäische Erdgas-Pipeline-Netz: ein skalenfreies Netz mit sehr vielen Transitnoten

In einem sog. skalenfreien Netz sind die meisten Knoten mit nur sehr wenigen anderen Knoten verbunden, während einige wenige Knoten mit vielen anderen verbunden sind. Die Verteilung der Knotengrade hat also ein „fettes Verteilungsende“ (fat tail).



Kumulierte Knotengrad-Verteilung



Knotenverteilung

# Knoten mit dem höchsten Grad in Europa

**Table 1:** Highest-degree nodes in  $G$

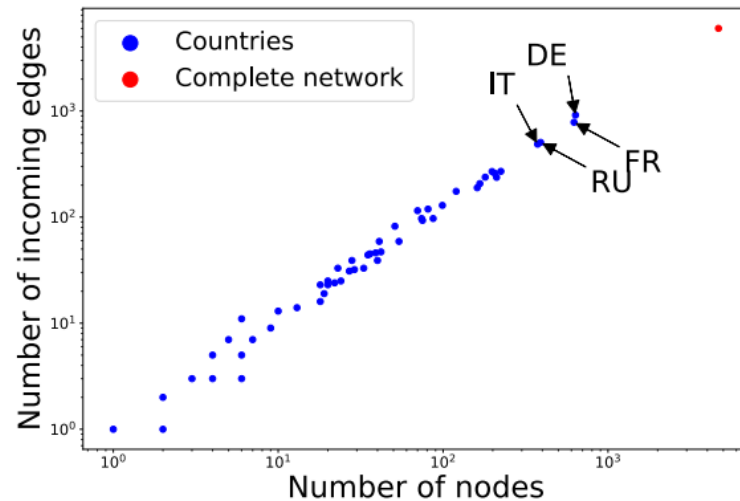
| Node id       | CC | Node type                                     | Degree |
|---------------|----|-----------------------------------------------|--------|
| N_2631_S_LMGN | AT | Consumer, compressor, and borderpoint (AT/DE) | 16     |
| N_283_L_LMGN  | BE | Borderpoint (BE/NL)                           | 14     |
| LKD_N_94      | DE | Compressor and borderpoint (DE/CZ)            | 14     |
| LKD_N_8       | DE | Consumer                                      | 14     |
| LKD_N_3       | DE | Node                                          | 12     |
| LKD_N_39      | DE | Node                                          | 12     |

Besonders hohe Vernetzung in Mittel-West-Europa: Österreich, Belgien, Deutschland

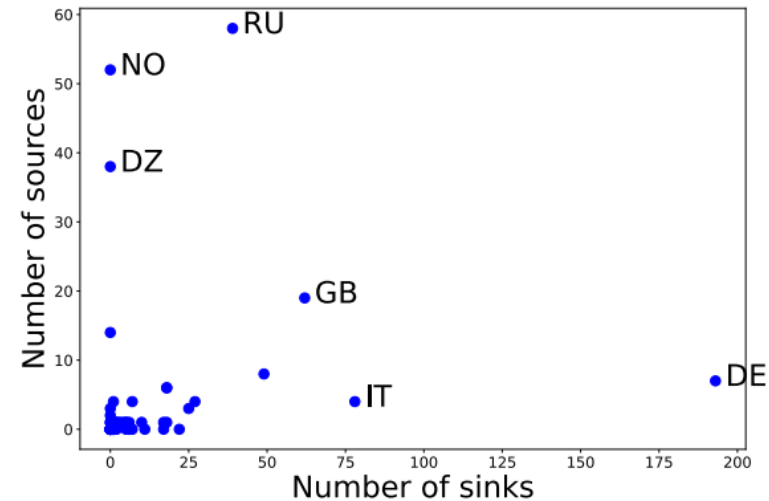


# Herausragende Bedeutung einiger weniger Länder im europäischen Erdgasnetz

Einige Länder haben besonders vielen ankommende Pipelines bzw. Senken (DE), andere hauptsächlich Quellen bzw. Produktionsknoten (NOR, RUS, ALG)



(a) Number of incoming edges vs. number of nodes per country



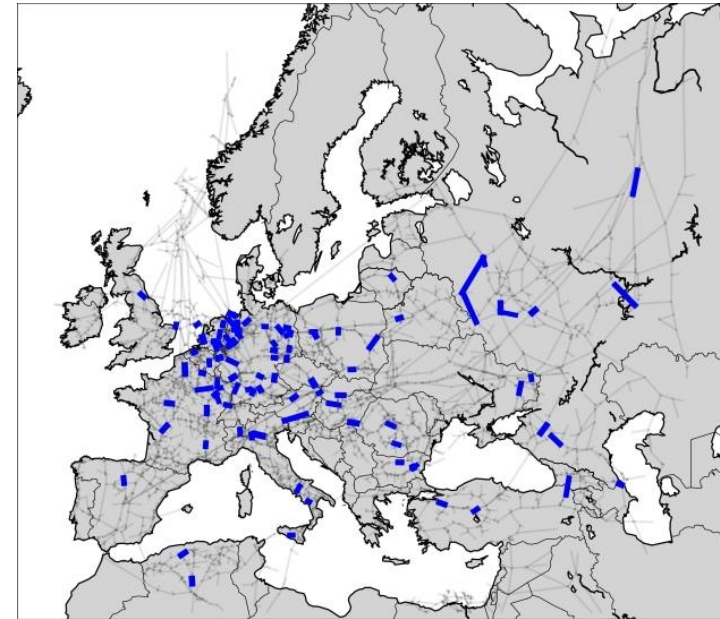
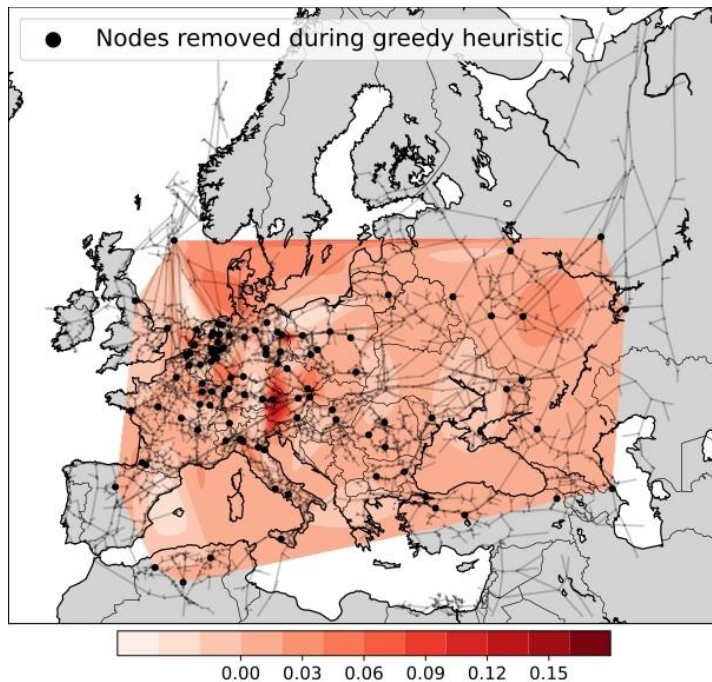
(b) Number of sinks vs. number of sources per country

**Fig. 2:** Country-level topological insights.

Note: Plot (a) shows the number of incoming edges versus the number of nodes per country, with the axes representing log-normal scales. Plot (b) shows the number of sinks versus the number of sources per country. Countries in the upper left are predominantly exporters of natural gas, while countries in the lower right are primarily importers

## Entfernen von zentralen Netzelementen (Knoten / Kanten)

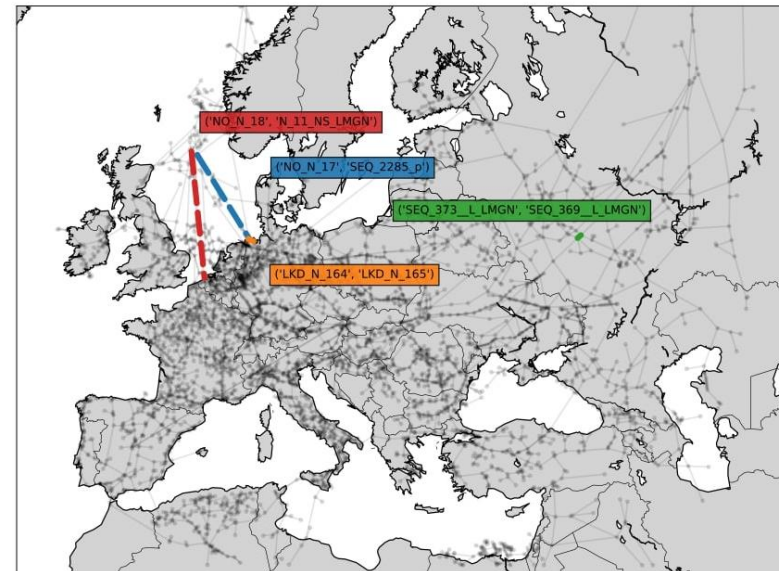
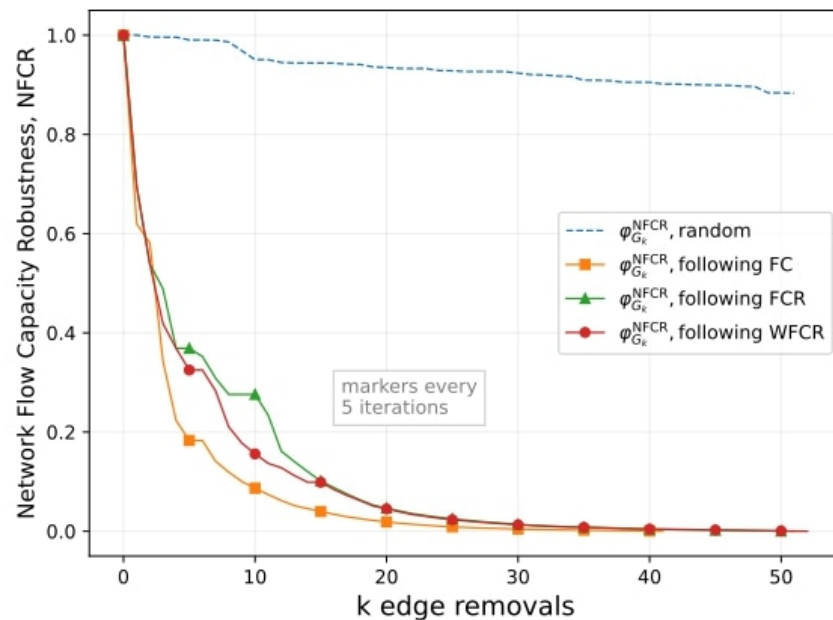
Zentralste Netzelemente sind in Mittel-West-Europa: wenn sie entfernt werden, sinkt die Verbundenheit des Gesamtnetzes deutlich. Insbesondere das Entfernen von Knoten in AT und DE bzw. von Kanten in IT und CZ würde das Gesamtnetz zerfallen lassen.



In (a), the NCPI damage inflicted by the removal of the node is proportional to its color strength. In (b), the thickness of the edge is proportional to the impact on NCPI.

# Gezielte Reduktion der Gesamtdurchflusskapazität

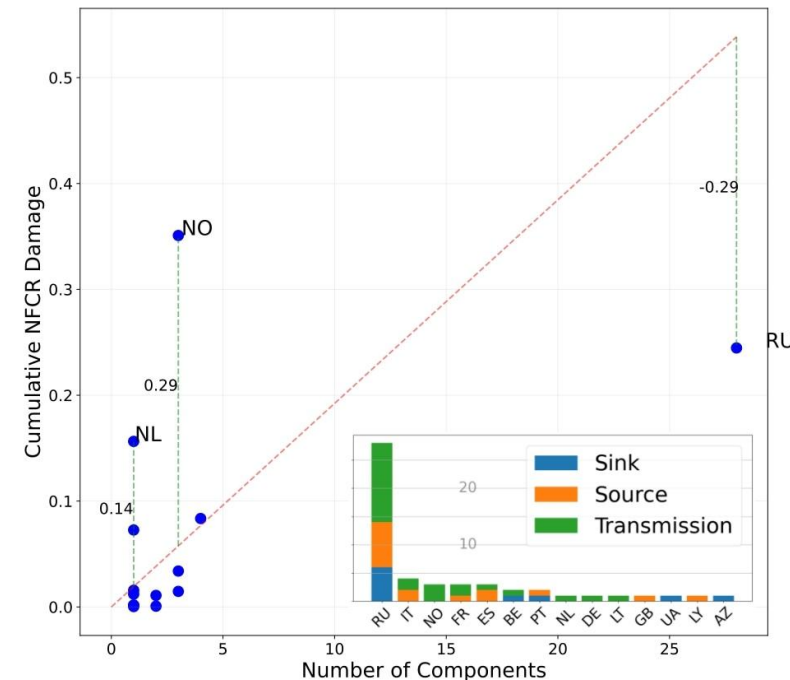
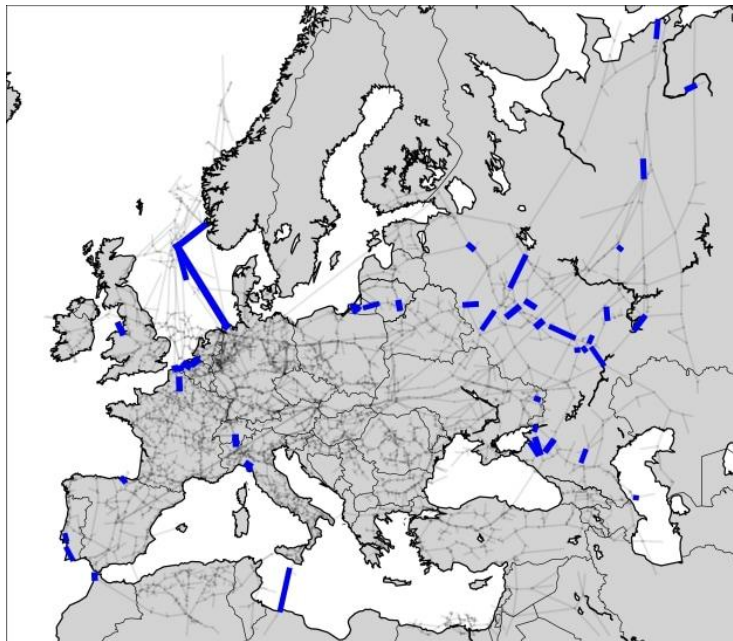
- Zufälliger Ausfall von Netzkomponenten hat nur geringe Auswirkungen
- Gezielter Ausfall von nur wenigen Netzelementen, die wichtig für die Gesamtdurchflusskapazität des Netzes sind (à la Cai et al., 2021), würde die Kapazität des Netzes deutlich reduzieren.



Here: NFCR for edge removals. In (a), markers are placed every 5<sup>th</sup> iteration. In (b), only selected edges are shown.

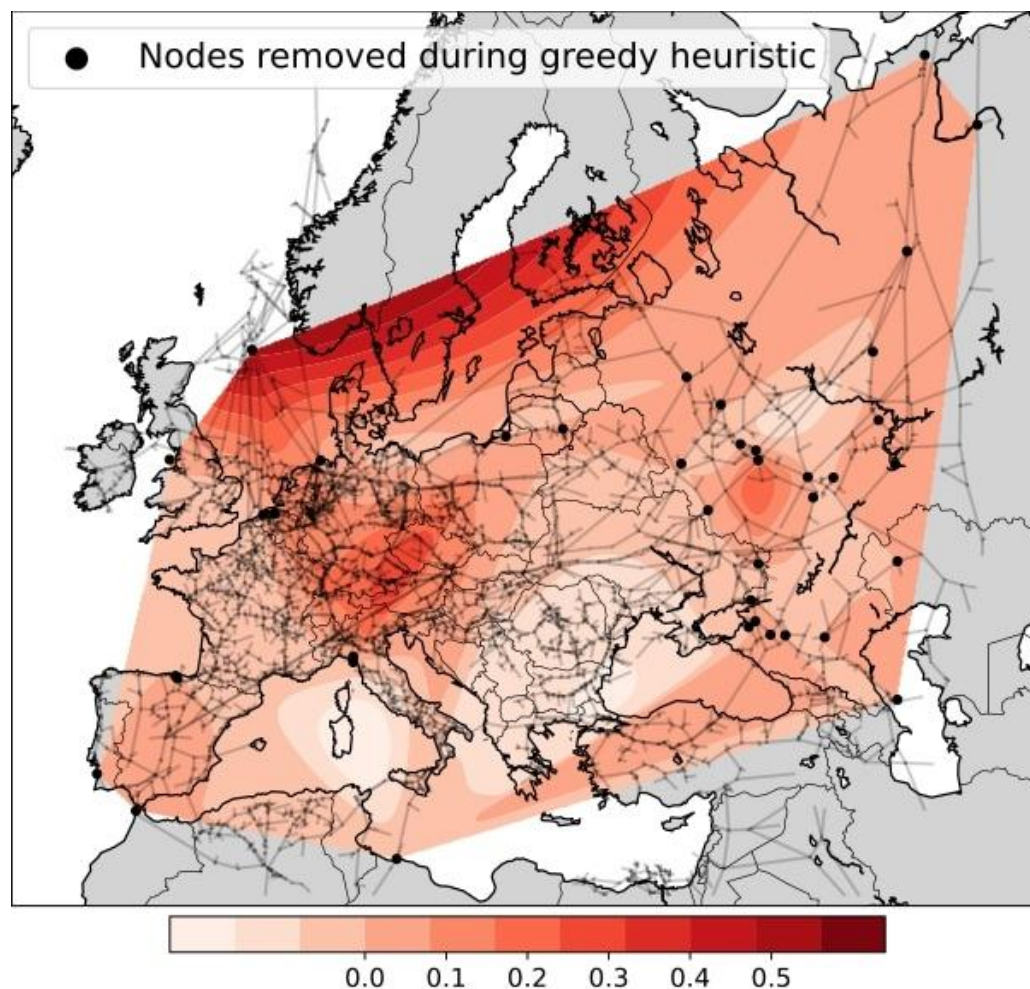
# Gezielter Kanten-Ausfall führt zu starker Senkung der Durchflusskapazität

Neben Transit-Pipelines sind auch Pipelines von Quellen (Produktion) bzw. zu Senken (Verbrauchs- oder Speicherknoten) kritisch für die Flusskapazität im Netz, insbes. aus RUS, NOR  
→ Neue LNG-Terminals und Anschluss-Pipelines noch nicht berücksichtigt



In (a), the highlighted edges are those removed with their thickness scaled by NCFR damage. The same information is shown in (b), aggregated to the country level and categorized by type of pipeline.

# Auswirkungen von Knoten-Ausfall auf den Maximum Flow



Kritische Knoten sind insbesondere Bottlenecks von großen Produzenten zu Verbrauchssenen in Europa, insbes. in/aus Norwegen, aber auch in/aus Russland.

Geographical Representation of NCFR Damage (node removal)

- Graphentheoretische Analysen bieten eine weitere Möglichkeit, die Versorgungssicherheit in netzgebundenen Sektoren zu untersuchen.
  - Das europäische Erdgasnetz ist robust gegen zufällige Angriffe, aber stark anfällig gegen gezielte Angriffe auf zentrale Netzelemente oder Bottlenecks.
  - Zentrale Netzelemente befinden sich in Mittel-Westeuropa (GER, FR, ITA). Mit nur 100 gezielten Ausfällen von zentralen Netzelementen (Knoten oder Kanten) würde die Verbundenheit des Netzes auf 10% sinken.
  - Der Ausfall von Transitknoten ohne Redundanzen (in Norwegen, Russland) würde den maximalen Fluss im Pipeline-Netz deutlich reduzieren.
- Trotz mittel- und langfristig sinkender Erdgasnachfrage könnte die Schaffung redundanter Pipeline-Infrastruktur an einigen Stellen in Europa sinnvoll sein.
- Import-Pipelines aus Norwegen sind besonders kritisch

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



**DIW Berlin — Deutsches Institut  
für Wirtschaftsforschung e.V.**

Anton-Wilhelm-Amo-Straße 58, 10117 Berlin  
[www.diw.de](http://www.diw.de) Twitter: @DIW\_Berlin

**Prof. Dr. Franziska Holz**

DIW Berlin &  
[fholz@diw.de](mailto:fholz@diw.de)

Norwegian University of Science and Technology (NTNU)  
NTNU Energy Transition Initiative (NETI)

[https://github.com/johanmasvie/iggielgn\\_topology\\_analysis](https://github.com/johanmasvie/iggielgn_topology_analysis)

## Open access

Scigrid\_gas: <https://zenodo.org/records/4767098>

Neue Initiative : Sci2grid

Unser Datensatz und Python-Code:

[https://github.com/johanmasvie/iggielgn\\_topology\\_analysis](https://github.com/johanmasvie/iggielgn_topology_analysis)

- **Centrality:** different measures that are an indicator of the «critical» (central) role of an arc or node (e.g., betweenness, degree)
- **Degree:** the number of (incoming/outgoing) edges that are incident to the node
- **Closeness centrality:** measures a node's proximity to all other nodes in a graph, indicating how easily it can reach them. It is calculated as the inverse of the sum of the shortest paths  $\sigma$  from that node to all other nodes  $i$  in the graph.

- **Connectedness:** assesses the structural integrity of the network as entities are removed, includes the size of its largest connected component, as well as the number of weakly connected components and strongly connected components.
- **Reach:** measures the network's ability to maintain flows globally, using network diameter\* as a proxy (scaled by the number of nodes in the network to account for the automatic decrease of the diameter with a decreasing number of nodes).
- **\*Diameter:** it is the greatest distance between any pair of nodes. To find the diameter, calculate the shortest path between each pair of nodes and take the greatest length of these paths.

- **Maximum flow:** maximum amount of flow (i.e., natural gas) that can be sent through the network between all node pairs, given the capacity constraints on the edges (pipelines)
- **Network flow capacity robustness (NFCR)** (following Cai et al., 2021): measures network performance and thereby extends robustness indicators that analyse whether the network remains connected; assesses how well the damaged network maintains flows under the removal of  $k$  entities (nodes or arcs), compared to its initial state performance; we predefine sinks and sources in the European gas grid

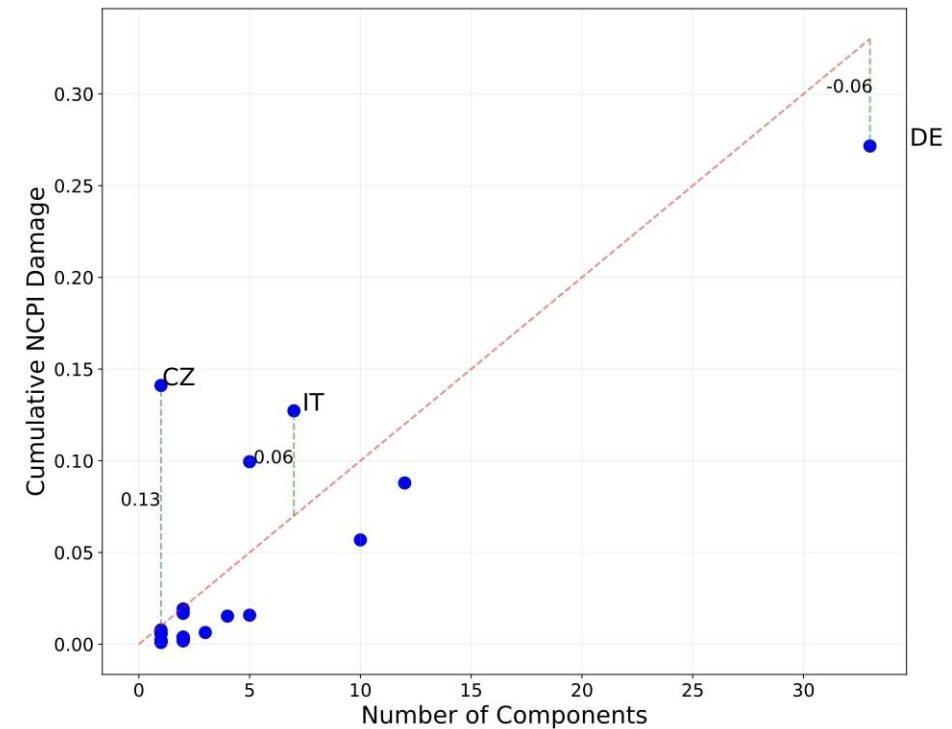
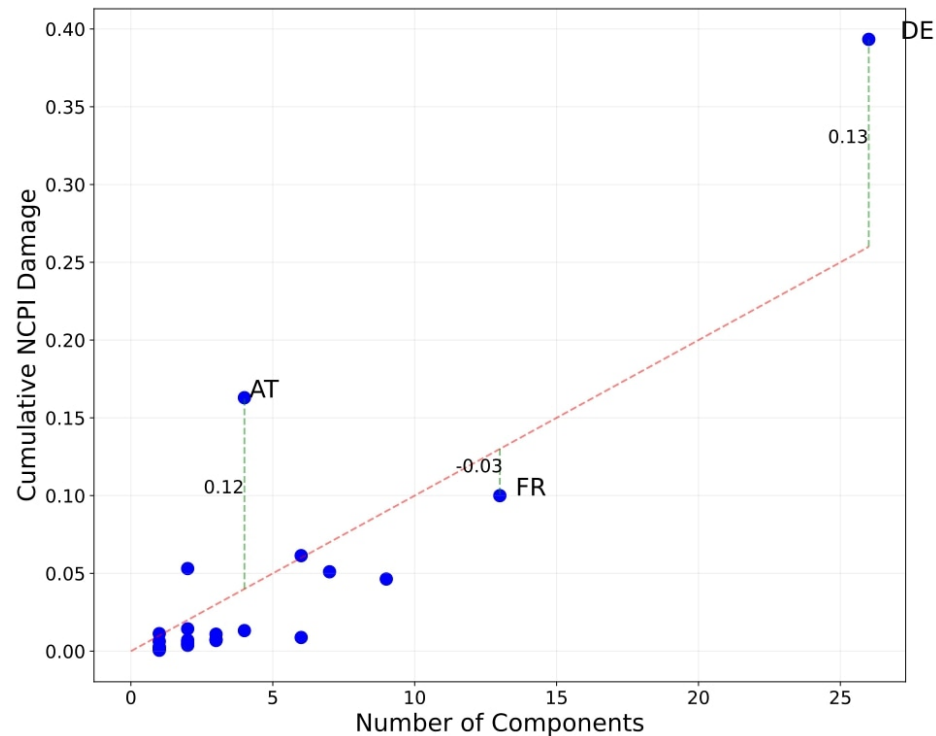
# Entscheidungskriterien für die Ausfall-Simulation von kritischen Netzelementen (Knoten /Kanten)

---

- Zufällige Auswahl
- Auf Basis der Zentralität bzw. eines umfassenden Index bestehend aus Betweenness-Zentralität, Closeness-Zentralität und Knoten-Degree-Zentralität  
→ Stark vernetzte Knoten/Kanten prioritär entfernen
- Auf Basis des maximalen Durchflusses:
  - gewichtete Durchflusskapazität (*weighted flow capacity rate*, WFCR) à la Nicholson et al. (2016) (auf Basis von Fluss-Zentralität und Flusskapazität)
  - Fluss-Zentralität (*flow centrality*, FC) : Summe aller Kantenflüsse für alle Quelle-Senke-Paare im Verhältnis zum gesamten maximalen Durchfluss
  - Flusskapazität (*flow capacity rate*, FCR): Summe der Gesamtflüsse aller Quelle-Senke-Paare im Flusskapazität (*flow capacity rate*, FCR)

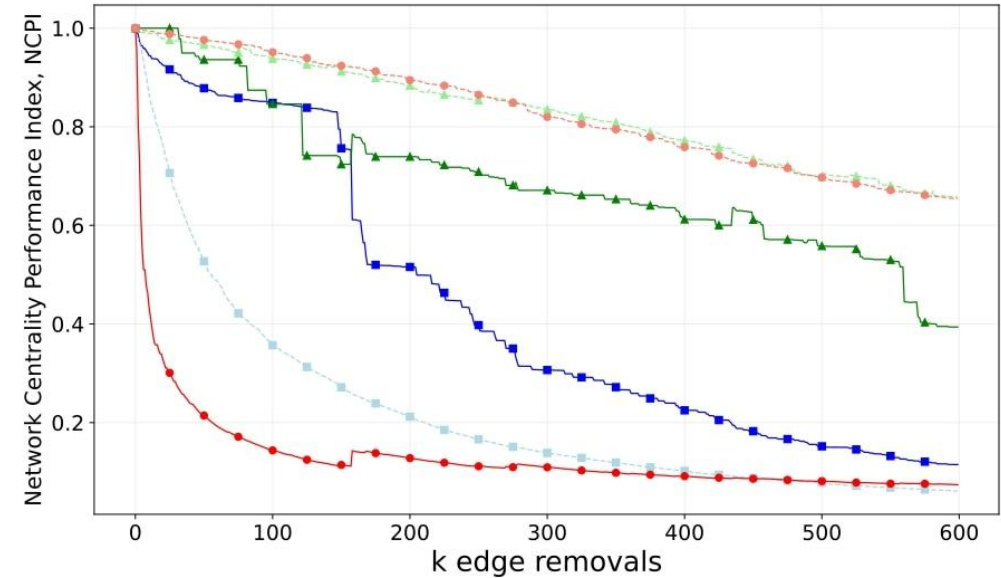
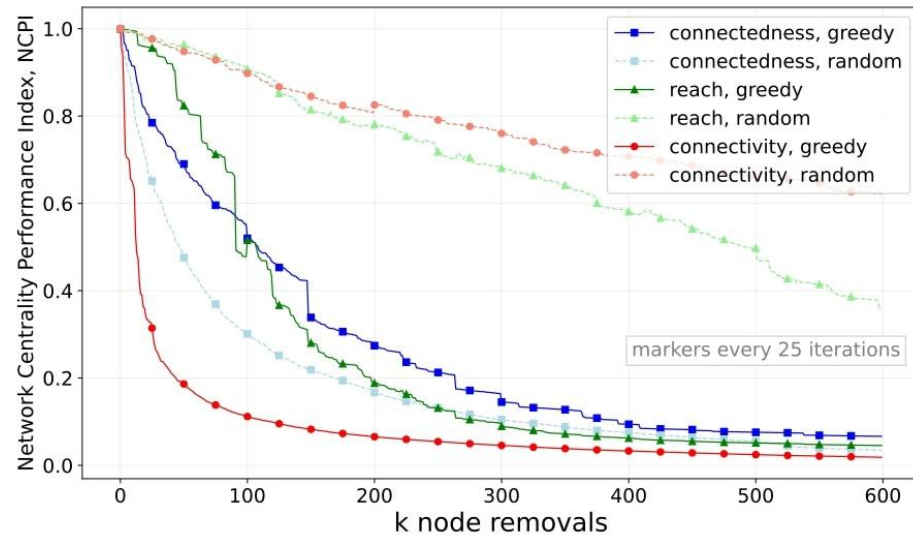
# Enorme Auswirkungen des gezielten Entferns von zentralen Netzelementen

30-40% weniger Stabilität des Netzes beim Entfernen von  $< 1\%$  der Knoten bzw. Kanten



The scatter plots show the number of components removed (x-axis) and their associated cumulative damage to the NCPI of the network (y-axis), on a country-level, with the grid-average represented by the red-dashed line.

# Enorme Auswirkungen des gezielten Entferns von zentralen Netzelementen



- calculated at each  $k^{\text{th}}$  iteration of removing a node/edge
- $\text{NCPI} = \text{Connectedness} \cdot \text{Reach} \cdot \text{Connectivity}$

- Murray et al. (2008, <https://doi.org/10.1111/j.1468-2257.2008.00447.x>) unterscheidet vier verschiedene Arten der techno-ökonomischen Analysen der Versorgungssicherheit:
  1. Mathematische Modellierung
  2. Szenarienanalysen
  3. Simulationen
  4. Strategische Analysen
- Nur wenige Analysen fokussieren auf das (Pipeline-) Netz und nutzen graphentheoretische Metriken
- Weitere Analysen betrachten die technische Sicherheit und Zuverlässigkeit des Netzes bzw. von Netzkomponenten, z.B. mit Ausfallwahrscheinlichkeiten von Komponenten, z.B. Fakhravar et al. (2017, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.036>), Badida et al. (2019, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.010>), Lustenberger et al. (2019, <https://doi.org/10.3390/en12244685>)

- Die Scigrid\_gas Website ist nicht mehr online, aber das Zenodo Repository:  
(<https://zenodo.org/records/4767098>)
- Neue Initiative : Sci2grid → Aktualisierte Analysen in Zukunft möglich
- Unser Datensatz und Python-Code:  
[https://github.com/johanmasvie/iggielgn\\_topology\\_analysis](https://github.com/johanmasvie/iggielgn_topology_analysis)