

Validierung eines Schnellbewertungstools von elektrischen Netztopologien zur Skalierung von RES und modernen Lasten auf der Niederspannungsebene

Internationale Energiewirtschaftstagung 2021

Anna Traupmann

8.9.2021

Virtual Room 1: Parallelsession 3A: Netze II

14:15 – 16:15

*Ausbau an RES und Integration moderner Lasten (EV und HP)
eine bereits vorhandene Herausforderung*

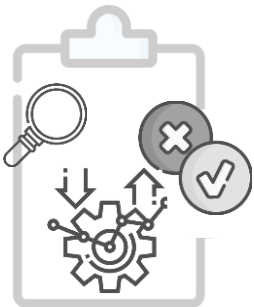
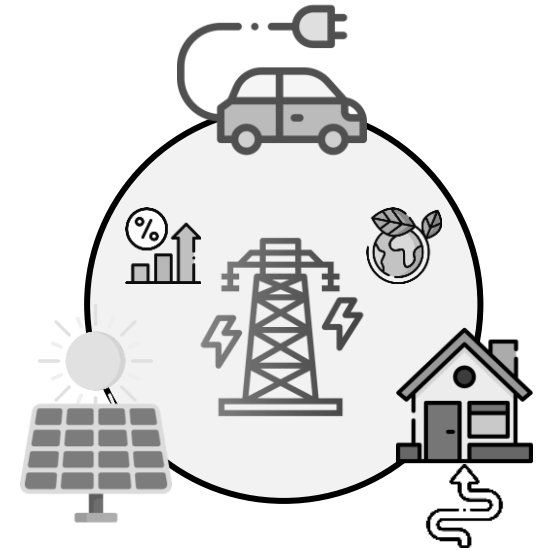
- Erzeugungsüberschüsse und –engpässe
- Zeitlicher und räumlicher Ausgleich notwendig
 - Zeitlich → Speicher, Flexibilitäten
 - Räumlich → Netze

*Elektrische Netze stellen durch begrenzte Speicher- und
Übertragungskapazitäten eine infrastrukturelle Schwachstelle
der Energiewende dar*

*Netze haben unterschiedliche
Leistungsfähigkeit →
Netztopologische Unterschiede*

Einleitung

Motivation der Arbeit



Bewertung der Leistungsfähigkeit

Schnellbewertungstool basierend auf rein topologischen Daten

*Ergebnisse der topologischen Analyse ermöglichen Rückschlüsse auf
maximal mögliche Ausbaugrade an RES, HP und EV ohne weitere
Netzentlastungsmaßnahmen einzusetzen*

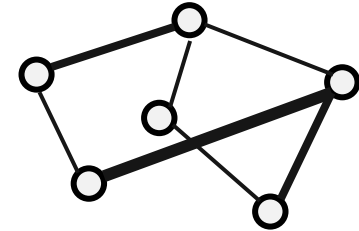
*Annahme: Netze mit ähnlichen topologischen
Parametern erreichen ähnliche Ausbaugrade*

Topologische Analyse

Graphentheoretische und Netzstabilitätsparameter

Graphentheorie dient der einfachen Beschreibung abstrakter Strukturen

Ein Graph ist ein Objekt das aus Knoten und Kanten besteht → Beschreibung elektrischer Netze



Elektrisches Netz kann durch einen gewichteten (Leitungsparameter und –längen) und ungerichteten Graphen (bidirektionaler Lastfluss) beschrieben werden.

Über die Parameteranalyse können Schwachstellen im Netz erkannt werden und die Gesamtperformance beurteilt werden

Leistungsdaten (R', X'_L, C', l)
Transformatordaten ($S_r, U_{r,1}, U_{r,2}, \dots$)
Netzstruktur (Verbindungen, ...)
Netztyp (städtisch, ländlich, ...)
Spannungsebene
Knotentyp (Slack, PV, PQ)

Globale Parameter

Knotenparameter

Leitungsparameter

Bewertung des Gesamtnetzes

Bewertung von Netzknoten

Bewertung von Leitungen

Globale Effizienz $E(\zeta)^*$
Stabilität $S(\zeta)^*$

Betweenness Centrality
 $BC(v)^*$

Maximale Leitungslängen $l(l)$
Gesamtleitungslänge $L(l)$

Mathematisch-
topologische
Parameter

Net Ability $A(\zeta)^*$
Kurzschlussleistung $S_{sc}(\zeta)$
Vermaschungsgrad $v(\zeta)$

Entropischer Grad $g(v)^*$

Physikalisch-
betriebliche
Parameter

Topologische Analyse

Graphentheoretische und Netzstabilitätsparameter

Entropic Degree

Maß für die Konnektivität (beinhaltet Stärke einer Leitung, Anzahl der verbundenen Leitungen & Verteilung der Gewichtung)

$$g_i(v) = \left(1 - \sum_j n_{ij} \cdot \log n_{ij}\right) \cdot \sum_i w_{ij}$$

Identifikation kritischer Knotenpunkte
→ hoher Entropic Degree bedeutet ein sehr belasteter Knoten

Net Ability

Maß für die Funktionsfähigkeit eines Netzes, Berechnung berücksichtigt maximalen Lastfluss in den Leitungen C, Verteilung des Lastflusses im Netz PTDF & Leitungsimpedanz (Z_e)

$$A(\Gamma) = \frac{1}{N_g \cdot N_d} \sum_{g \in \zeta_g} \sum_{d \in \zeta_d} C_g^d \frac{1}{Z_e^{gd}}$$

mit $C_g^d = \min_{l \in L} \frac{p_l^{max}}{|PTDF_l^{gd}|}$

Rückschlüsse auf Leitungen im Netz → hohe Net Ability deutet auf starke Leitungen und daher unwahrscheinliche Leitungsüberlastungen hin

Global Efficiency

Maß für die Gesamtperformance eines Netzes hinsichtlich Effizienz der Energieübertragung und beschreibt indirekt die Verluste der Übertragung

$$E(\Gamma) = \frac{1}{N \cdot (N - 1)} \cdot \sum_{i \neq j \in \Gamma} \frac{1}{p_{i,j}(v)}$$

→ Hoher je weniger Verluste
(Zusammenhang mit Verkabelungsgrad und Netzgröße)

Betweenness Centrality

Zentralitätsgröße, die die Beteiligung eines Knotens an den kürzesten Pfaden angibt

$$BC_{ij}(v) = \sum_{v_s \neq v_i, v_t \neq v_j} \frac{k_{s,t}(v)}{k_{s,t}}$$

Identifikation wichtiger Knotenpunkte
→ hohe Betweenness Centrality bedeutet eine Gefährdung von Spannungsbandabweichungen

Kurzschlussleistung

Maß für die Spannungsqualität und Störfestigkeit in einem Netz

$$S_k = \frac{c \cdot U_n^2}{Z}$$

→ Hohe Kurzschlussleistung bedeutet, dass das Netz auf Störungen stabil reagiert

Um basierend auf topologischen Daten betriebliche Größen (maximale Ausbaugrade) zu beurteilen, müssen die topologischen Größen mit den betrieblichen Größen verknüpft werden

Schnellbewertungstool

Maximale Ausbaugrade werden über die Belastungsgrenzen des Netzes definiert:

- Spannungsbandverletzungen
- Leitungsüberlastungen

Beliebige Analyse von Netzen der gleichen Spannungsebene möglich
→ Topologische Parameter des Netzes ermöglichen Rückschlüsse auf Ausbaugrade

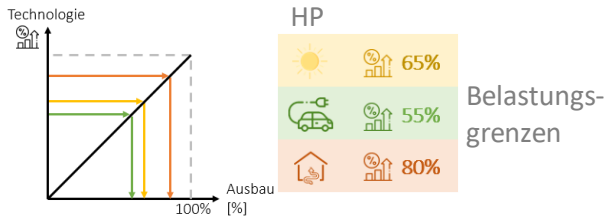
Referenznetz

Berechnung der topologischen Parameter

Globale Parameter	Knotenparameter	Leitungsparameter
Bewertung des Gesamtnetzes	Bewertung von Netzknoten	Bewertung von Leitungen
Globale Effizienz $E(\zeta)$ Stabilität $S(\zeta)$	Betweenness Centrality $BC(v)$	Maximale Leitungslängen $l(i)$ Gesamtleitungslänge $L(i)$
Net Ability $A(\zeta)$ Kurzschlussleistung $S_{sc}(\zeta)$ Vermaschungsgrad $v(\zeta)$	Entropischer Grad $g(v)$	Mathematisch-topologische Parameter
		Physikalisch-betriebliche Parameter



Berechnung der Ausbauszenarien von RES, EV &



Maximale Ausbaugrade

Schnellbewertungstool

Reale Netze

Anwendung der Methodik des Schnellbewertungstools auf ein reales Netz

Maximale Ausbaugrade

Vergleich

Validierung

Vorteil:

- Geringe Datenbasis
- Keine vollständige Lastflussrechnung über lange Zeiträume
- Zusätzliche Netzanalyse zu Identifikation von Schwachstellen

Elektrische Referenz- und Realnetze

Charakterisierung der eingesetzten Netze

	Referenznetz	Stadtrand Netz	Ländliches Netz
<i>Knotenanzahl</i>	92 (14 Stränge)	120 (12 Stränge)	28 (3 Stränge)
<i>Leitungsanzahl</i>	92	121	27
<i>Leitungslänge</i>	5.93 km	5.69 km	2.31 km
<i>Verkabelungs- grad</i>	100 %	100 %	57 %
<i>Übergeordnete Spannungseben</i>	20 kV	20 kV	20 kV
<i>Transformator- leistung</i>	630 kVA	630 kVA	100 kVA
<i>Schaltgruppe</i>	Yz5	Dyn5	Yzn5

**Gemischte
Struktur –
städtisch
und ländlich**

**Städtisches
Gebiet**

**Ländliches
Gebiet**

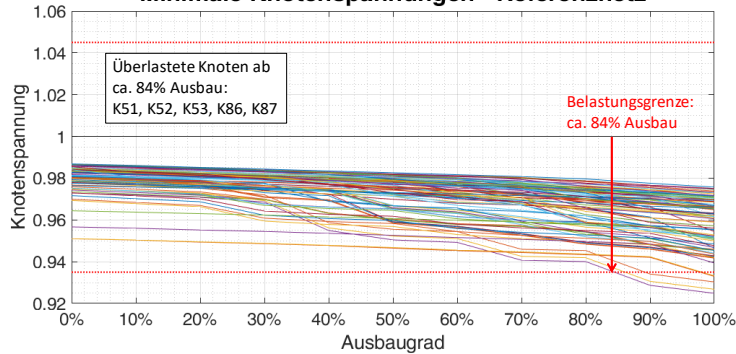
Reale Netze

Reale Netze sind an die Realität angenäherte Niederspannungsnetze im ENTSO-E Gebiet

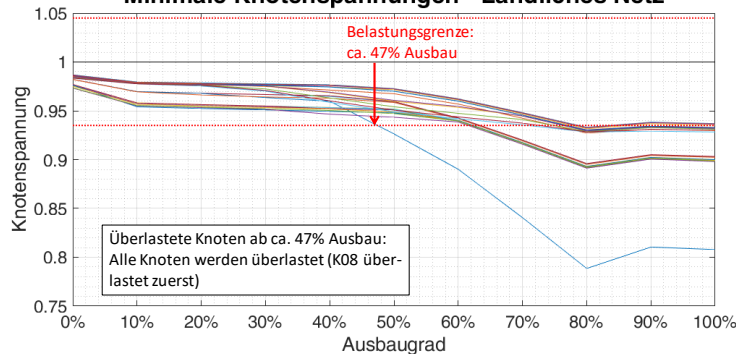
Ergebnisse Schnellbewertungstool

Maximale Ausbaugrade

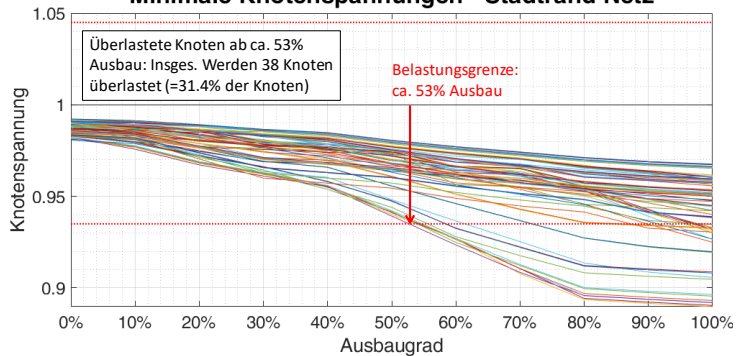
Minimale Knotenspannungen - Referenznetz



Minimale Knotenspannungen - Ländliches Netz



Minimale Knotenspannungen - Stadtrand Netz



Ausbau an EV (11kW Ladeleistung), HP und PV:

- Berechnungen für einen kritischen Fall (kälteste Winterwoche – stärkste Belastung durch HP)
- Gleichzeitiger Ausbau – Synergiepotentiale

Bestimmung der maximalen Ausbaugrade:

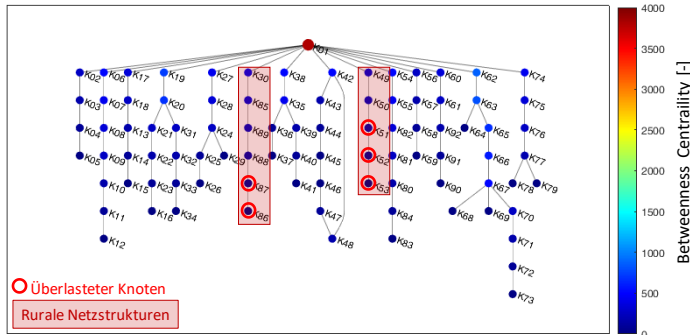
- Referenznetz
 - Stabil ausgelegt
 - Maximaler Ausbau bis ca. 84% möglich
 - Gemischte Struktur → starke Absenkung in den ruralen Strukturen
- Ländliches Netz
 - Maximaler Ausbau bis ca. 47% möglich
 - Rurale Strukturen (lange und schwächere Leitungen)
- Stadtrand Netz
 - Maximaler Ausbau bis ca. 53% möglich
 - Urbane Strukturen (kürzere, stärkere Leitungen)
 - Komplexes Netz mit langen Strängen

Limitierung erfolgt in allen Netzen aufgrund der Unterschreitung der zulässigen Spannungsgrenzen (0.935-1.045 p.u.)

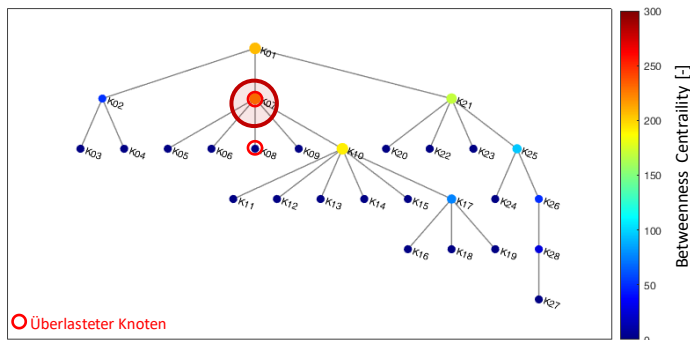
Ergebnisse Schnellbewertungstool

Topologische Analyse

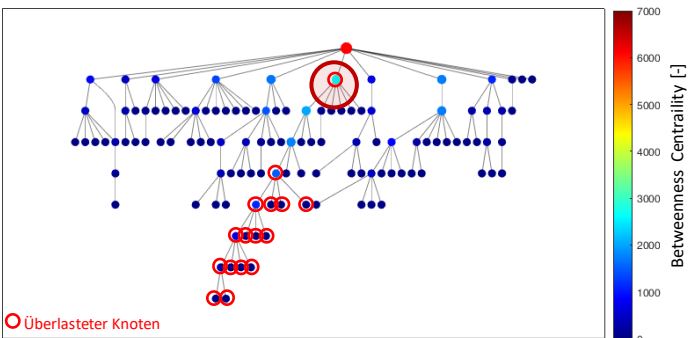
Referenznetz



Ländliches Netz



Stadtrand Netz



Referenznetz:

- Überlastete Knoten in ruraler Netzstruktur
- Restliche Netzstruktur sehr stabil → keine Kennzeichnung der Knoten durch BC

Ländliches Netz:

- Zuerst K08 überlastet – kritisch ausgewiesener Knoten ist K07
- Knotenspannung von K07 sinkt bei 47% Ausbau stark ab → K08 wird überlastet

Stadtrand Netz:

- Ebenso wird übergeordneter Knoten als kritisch ausgewiesen
- Untergelagerte Knoten am Strangende zuerst überlastet
- Strang mit Überlastung kann ausgewiesen werden

Erkennung kritischer Knotenpunkte nur bedingt möglich über die Betweenness Centrality

Ergebnisse Schnellbewertungstool

	Net Ability	Global Efficiency	Max. Entropic Degree	Min. Kurzschlussleistung
Referenznetz	-	-	↑	↓
Ländliches Netz	↓	↑	↓	↓
Stadtrand Netz	↑	↓	-	↑

Referenznetz:

- Gemischte Netzstruktur → Ergebnisse der Parameter nicht eindeutig
- Geringer Wert bei Kurzschlussleistung aufgrund ruraler Teilstrukturen

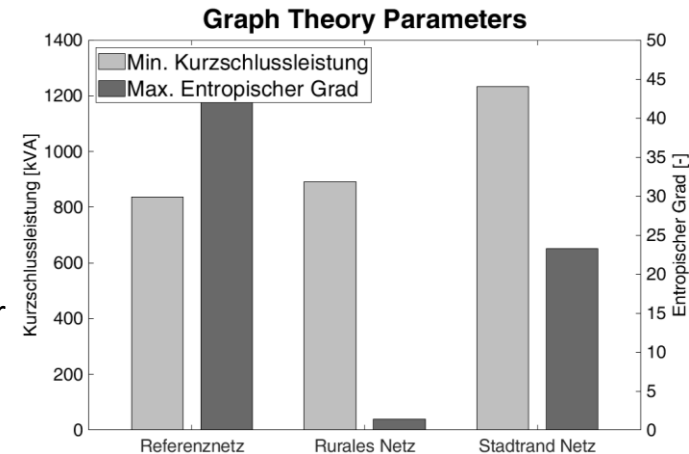
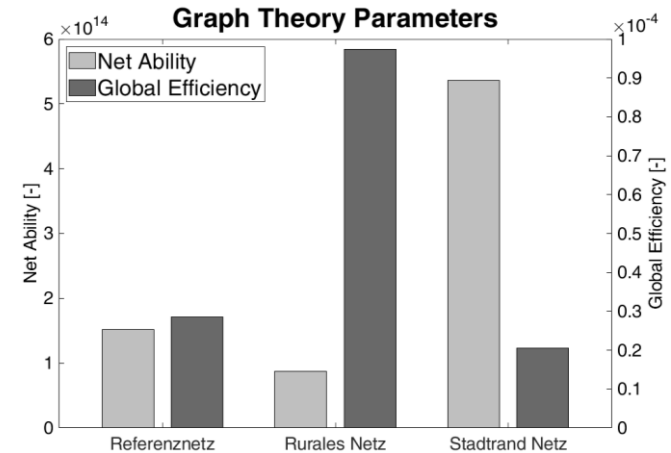
Ländliches Netz:

- Niedrige Net Ability → lange, schwache Leitungen
- Hohe Global Efficiency → geringe Netzausdehnung, effiziente Übertragung (geringe Verluste)
- Niedriger Entropischer Grad → kleines, wenig komplexes Netz
- Niedrige min. Kurzschlussleistung → rurale Struktur, lange Netzausläufer

Stadtrand Netz:

- Hohe Net Ability → kurze, starke Leitungen
- Geringe Global Efficiency → trotz 100% Verkabelungsgrad, hohe Netzausdehnung
- Mittlerer Entropic Degree → komplexere, verzweigtere Strukturen – mehrere kritische Knotenpunkte
- Hohe minimale Kurzschlussleistung → hohe Spannungsstabilität

Topologische Analyse



Schlussfolgerungen

Ländliche Netze:

Maximaler Ausbaugrad 40-50%

Begrenzung aufgrund Knotenspannungen

Städtische Netze:

Maximaler Ausbaugrad 50-60%

Begrenzung aufgrund Knotenspannungen

Annahme im Schnellbewertungstool: Netze mit ähnlichen topologischen Parametern erreichen ähnliche Ausbaugrade

- Referenznetz ist nicht geeignet als Vergleichsbasis im Bewertungstool
- Vergleichsbasis kann nur über reale Netze gleicher Netzstrukturen (urban, rural, suburban, ...) ermöglicht werden
- Anwendung auf höheren Spannungsebenen eventuell vorteilhafter
 - Mehr Parameter einsetzbar in der Analyse aufgrund komplexerer Strukturen
 - Im Niederspannungsnetz vielfach keine Parameterwerte, da diese von Vermaschungen abhängen

Bisherige Analysen aus der Literatur mittels dieser Parameter auf höheren Spannungsebenen durchgeführt (Übertragungsnetz)

Danke für Ihre
Aufmerksamkeit