

EINE HEURISTIK ZUR UMBAUPLANUNG VON NIEDERSpannungsNETZEN GANZER ORTSCHAFTEN



Agenda

- Einleitung
- Aufbau von Niederspannungsnetzen
- Optimierte Planung von Niederspannungsnetzen
- Repeated-Matching-Algorithmus
- Anwendung der optimierten Planung
- Zusammenfassung und Ausblick

Veränderungen in privaten Haushalten

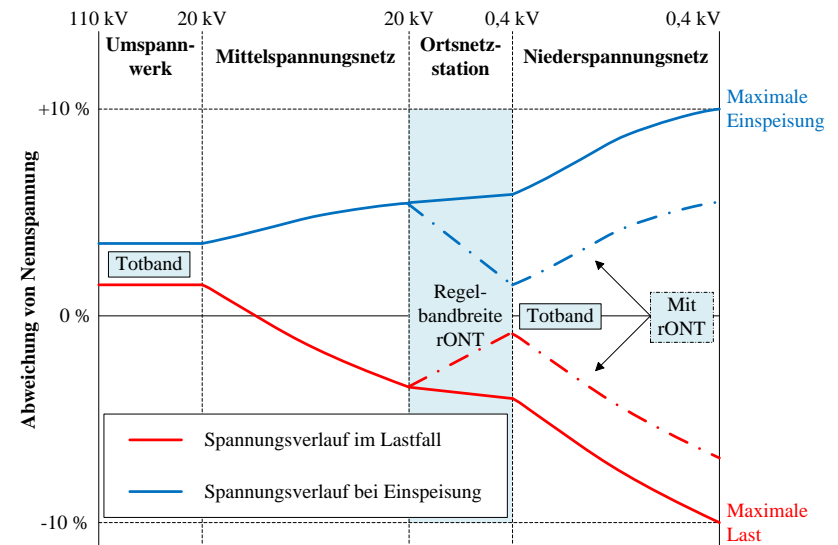


- Leistungselektronik
- LED-Technik
- E-Mobility
- Photovoltaik
- Wärmebereitstellung
- Batteriespeicher

Beispielwerte		2000	2014
Jahresverbrauch	$W_{a,ver}$	3500 kWh/a	5400 kWh/a
Jahreserzeugung	$W_{a,erz}$	0 kWh/a	-4500 kWh/a
Maximale Bezugsleistung	P_{max}	12,0 kW	15,0 kW
Minimale Bezugsleistung	P_{min}	0,1 kW	-4,9 kW

Neue Technologien im Verteilnetz (20 kV und 0,4 kV)

- Regelbare Ortsnetztransformatoren - rONT
- MS- und NS-Spannungslängsregler
- MS-Weitbereichsregelung
- Smart-Grid
- Speicheranwendungen



Beispiel: VNB

- ~2500 ONS
- Lebensdauer: 50 Jahre
- → Neubau/Ertüchtigung einer ONS pro Woche
- Investitionskosten pro ONS: 20.000 € - 100.000 €
- Effizienzsteigerungen
 - Zusammenlegung von ONS gewachsener Strukturen
 - Optimierung der Einbindung von Neu- und Umbaugebieten, etc.

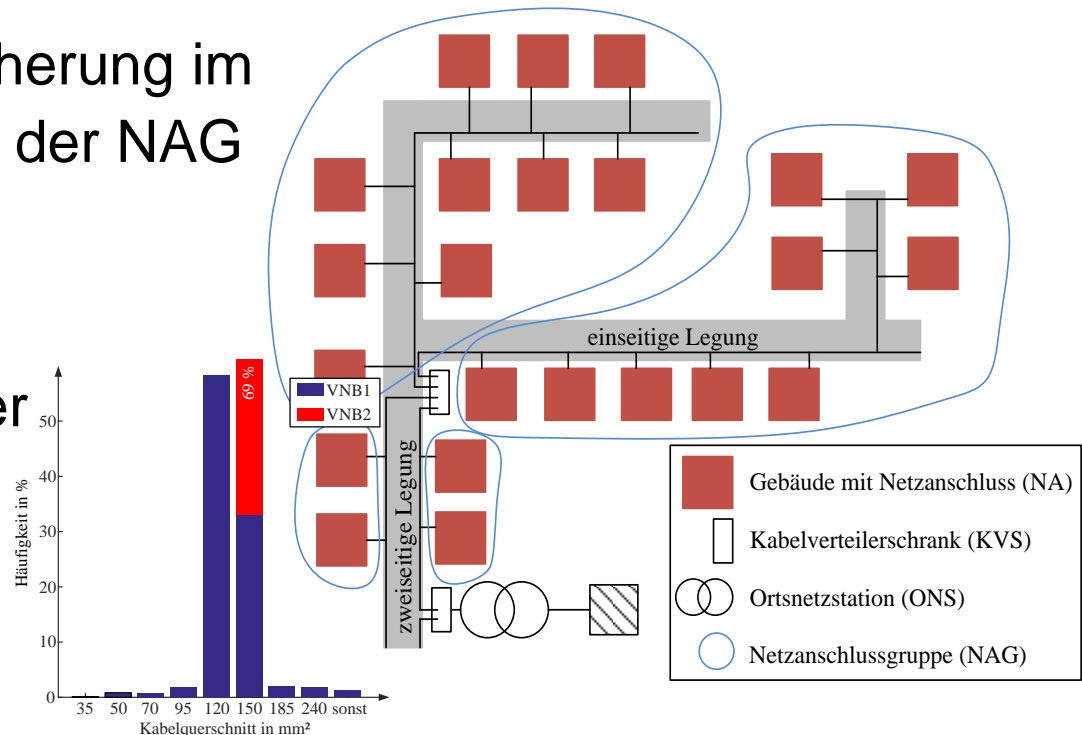


Agenda

- Einleitung
- Aufbau von Niederspannungsnetzen
- Optimierte Planung von Niederspannungsnetzen
- Repeated-Matching-Algorithmus
- Anwendung der optimierten Planung
- Zusammenfassung und Ausblick

Aufbau von Niederspannungsnetzen

- Die Leitungstrassen befinden sich in der Regel entlang der öffentlichen Straßen
- Hausanschlüsse werden auf die Leitung aufgemufft → NAG
- Durch setzen der NH-Sicherung im KVS kann die Zuordnung der NAG festgelegt werden
- üblicher Aufbau:
unvermascht aufgrund der einfachen Schutztechnik
- Verwendung von Standardbetriebsmitteln



Technischer Anforderungen in der NS-Ebene

- Schaltzustände und Netzauftrennungen können an Kabelverteilerschränken KVS durchgeführt werden
- Spannungsband die Netzspannung muss $230 \text{ V} \pm 10 \%$ betragen
- Thermische Festigkeit von Leitungen
- Nennleistung von Ortsnetzstationen
- Minimale Kurzschlussleistung
- N-1 Sicherheit wird in der Regel nur bis zur MS-Ebene konsequent angewendet

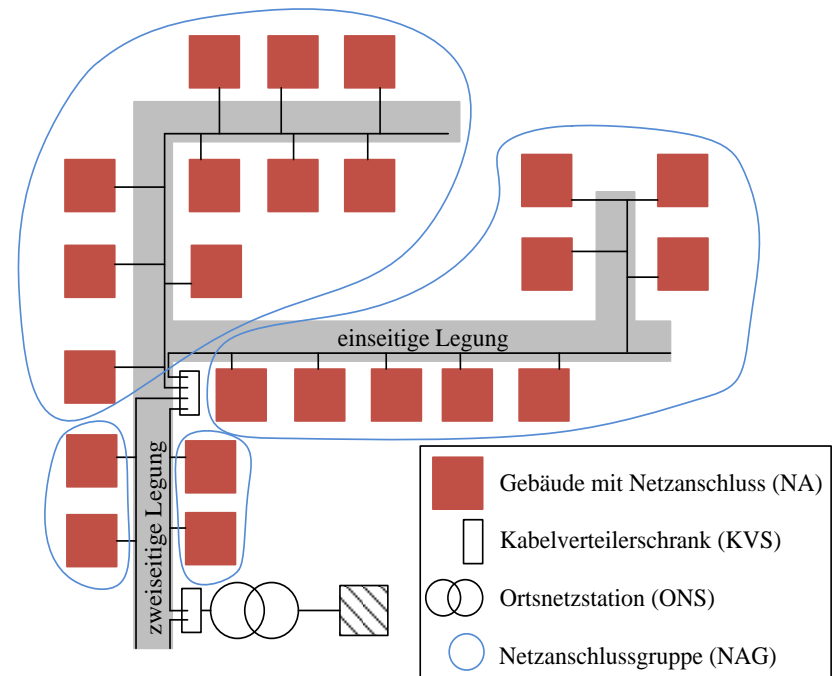


Agenda

- Einleitung
- Aufbau von Niederspannungsnetzen
- Optimierte Planung von Niederspannungsnetzen
- Repeated-Matching-Algorithmus
- Anwendung der optimierten Planung
- Zusammenfassung und Ausblick

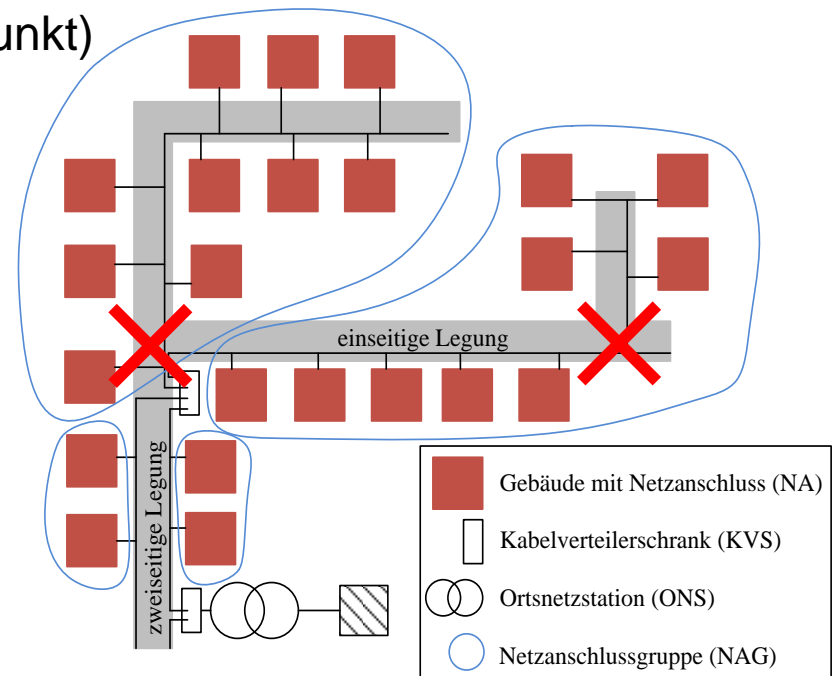
Vereinfachung durch Ordnungsreduktion (1): Gruppierung von Anschlüssen

- Niederspannungskunden werden in der Regel auf ein Kabel aufgemufft, d.h.: alle Gebäude bilden eine Gruppe und können nur gemeinsam einer Station zugeordnet werden
- Bei vorhandenen Netzdaten Berücksichtigung möglicher Trennstellen, andernfalls Annahme von KVS an bedeutenden Kreuzungen



Vereinfachung durch Ordnungsreduktion (2): Standortvorauswahl

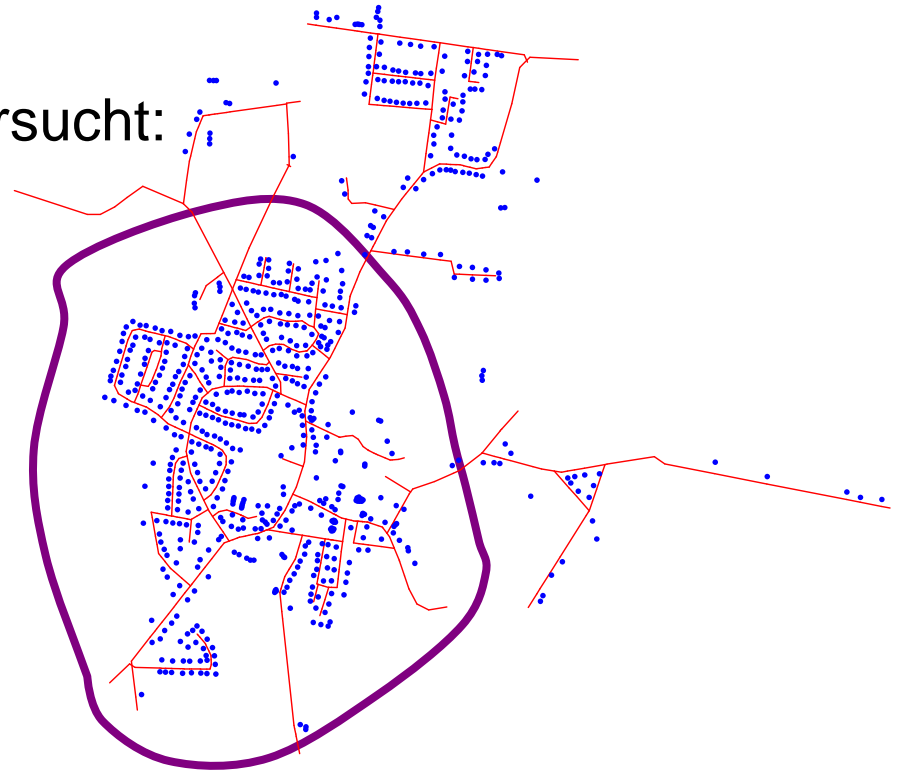
- Theoretisch kann eine ONS an jeder beliebigen Stelle stehen; tatsächlich:
 - Leistungsstarke Netzkunden (Schwerpunkt)
 - Straßenkreuzungen
- Ursache: Die Wahrscheinlichkeit vorhandener MS-Leitungen ist an Kreuzungspunkten größer; Abstände zu Anschlüssen sind geringer
- Reduktion auf
 - Lastschwerpunkte
 - Kreuzungen
- Hinterlegung der real möglichen Standorte auf Basis der Barwerte der Errichtungs- oder Modernisierungskosten



Entwicklung eines Optimierungsverfahren zur optimalen Positionierung von Ortsnetzstationen

drei verschiedene Ansätze untersucht:

- k-means-Heuristik
- Langrange-Relaxationen
- Repeated-Matching-Heuristik



ONS-Platzierung als FLP-Problem

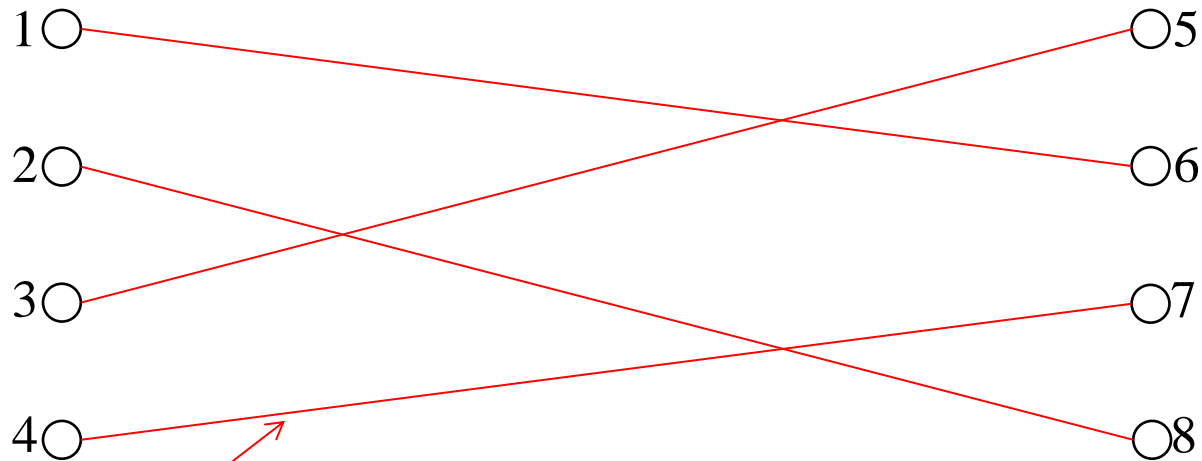
- Grundidee stammt aus der Logistik → Facility-Location-Problem (FLP)
- Genauere Definition: CFLPSS
 - Capacitated → begrenzte Transformator Nennleistung
 - Single Sourcing → keine geplante NS-Vermaschung der ONS
- Allg. Zielfunktion: $v(\text{CFLPSS}) = \min(\mathbf{C} \circ \mathbf{X} + \mathbf{f} \cdot \mathbf{y}) = \min\left(\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} f_i \cdot y_i\right)$
- Weitere Randbedingungen:
 - jede NAG muss versorgt sein $\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J$
 - keine Überlastung der ONS $\sum_{j \in J} \|a_j g_s x_{ij}\|_{\max \rightarrow s} \leq b_i \quad \forall i \in I$
 - Zuordnung von NAG nur an eröffnete ONS $x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in I, j \in J$
 - Ganzzahliges Optimierungsproblem $x_{ij}, y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J$

Direkte Lösung nicht möglich, daher Einsatz einer Matching-Heuristik

Agenda

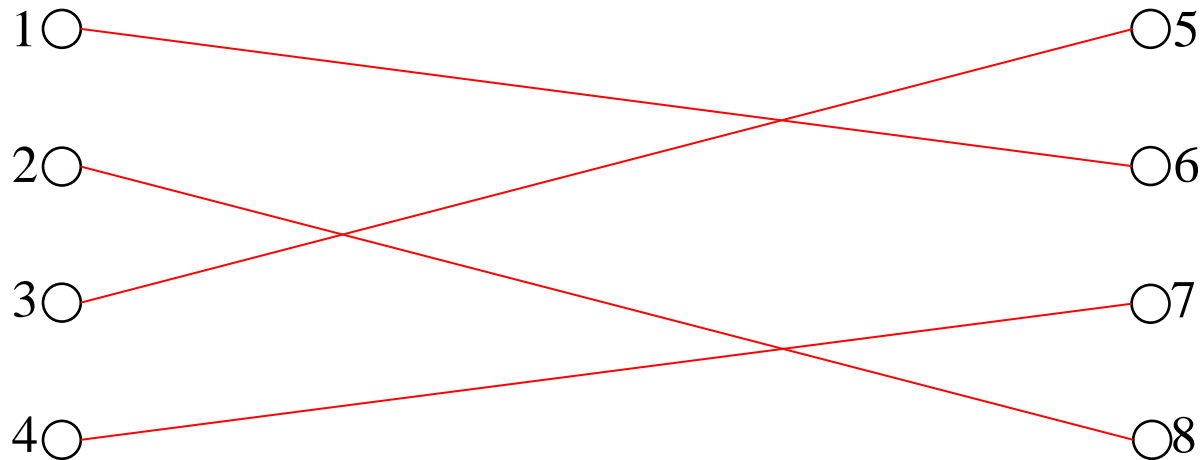
- Einleitung
- Veränderungen der Versorgungsaufgabe
- Aufbau von Niederspannungsnetzen
- Automatisierte Modellbildung von Niederspannungsnetzen
- Optimierte Planung von Niederspannungsnetzen
- **Repeated-Matching-Algorithmus**
- Anwendung der optimierten Planung
- Zusammenfassung und Ausblick

Beispiel: Minimum Matching Problem



- Menge A mit k Elementen $\{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ (wobei k gerade ist)
- **Matching:** jedes $a_{i \in A}$ wird mit einem $a_{j \in A}$ gepaart, wobei $j \neq i$

Beispiel: Minimum Matching Problem



- Symmetrische Zuordnungsmatrix $\mathbf{Z} =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Repeated Matching Algorithmus

- Ziel: Minimum Matchings finden (Zuordnungen)
- Elemente werden in drei Mengen L_1 - L_3 mit den Kardinalitäten n_1 - n_3 gebildet

$$L_1 = \{i \mid (i, N) \notin L_3\} \quad | \text{ nicht eröffnete ONS} \quad n_1$$

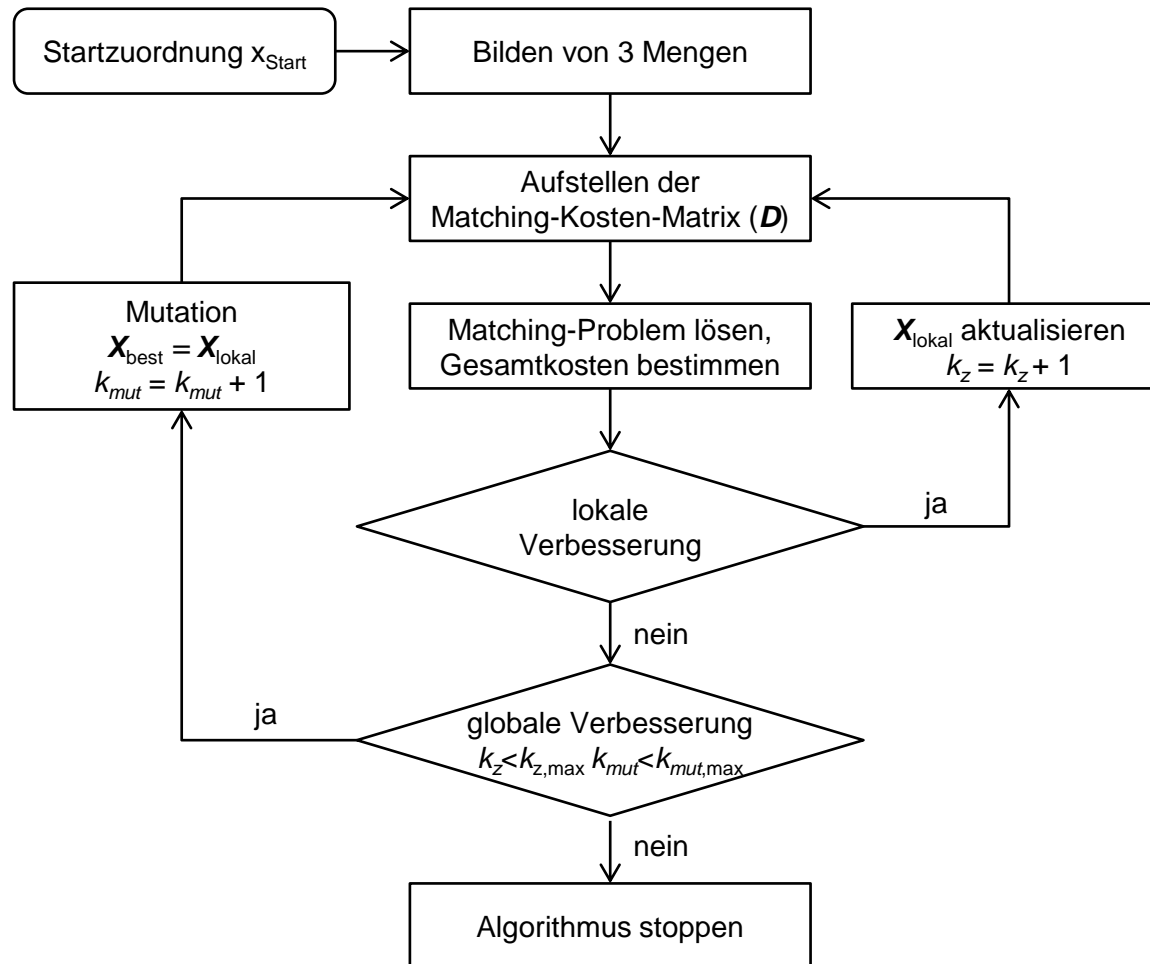
$$L_2 = \bigcup_{(i,C) \notin L_3} N \quad | \text{ nicht zugewiesene NAG} \quad n_2$$

$$L_3 = \{(i, N)\} \quad | \text{ eröffnete ONS mit zugeordneten NAG} \quad n_3$$

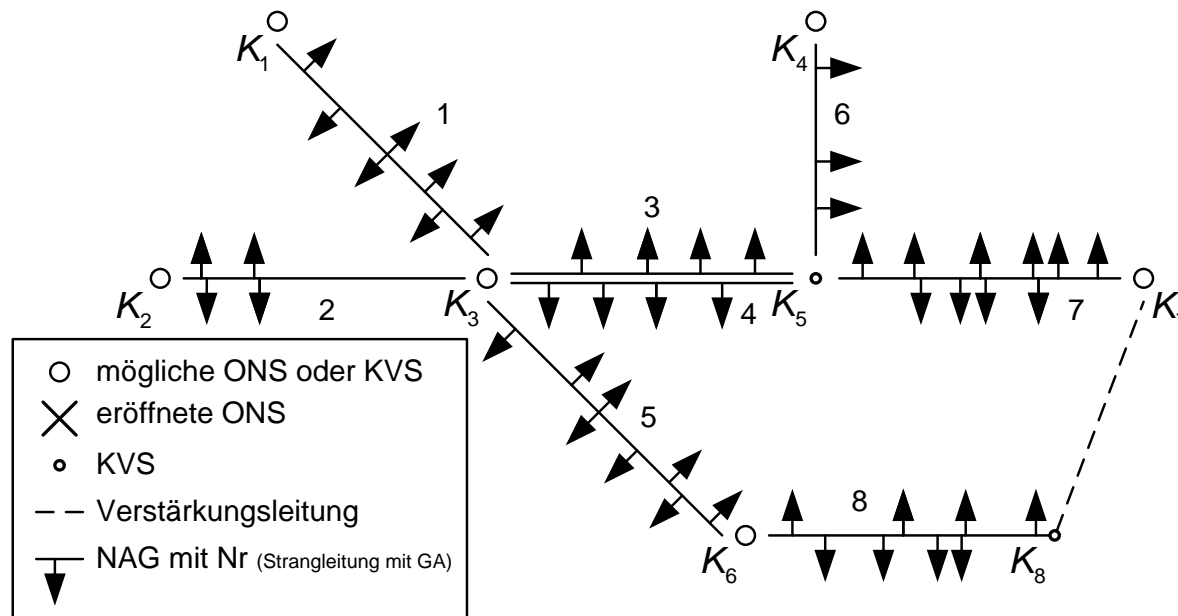
- In jeder Iteration versucht der Algorithmus eine günstigere Kombination der Mengen zu finden

$$B_{\text{Lösung}} = \mu \cdot n_2 + \mathbf{f} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{C} \circ \mathbf{X} = \mu \cdot n_2 + \sum_{i \mid (i,C) \in L_3} f_i + \sum_{\{(i,j) \mid (i,C) \in L_3, j \in C\}} c_{ij}$$

Übersicht: Repeated Matching Algorithmus



Beispiel



- Vorbereitende Maßnahmen
 - Aufstellen der Versorgungskostenmatrix **C**

Versorgungskostenmatrix \mathbf{C}

- Zwei Möglichkeiten zur Berechnung
 - Drehmomentansatz
((Impedanz oder Entfernung) \circ Gleichzeitigkeitsfaktor \circ Spitzenleistung)

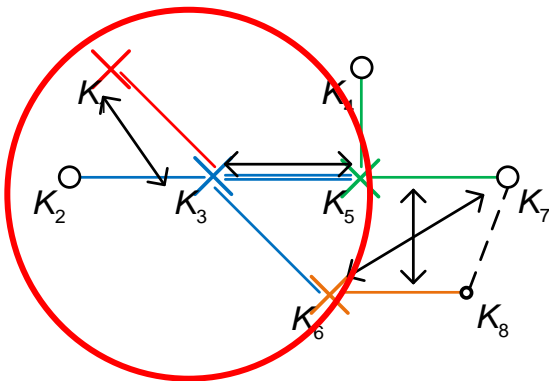
$$\mathbf{C} = \mathbf{E} \circ \|\mathbf{G} \circ \mathbf{A}\|_{\max \rightarrow s}$$

- Berechnung über Netzberechnung

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} MK_{ONS_1, NAG_1} & \dots & MK_{ONS_1, NAG_j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ MK_{ONS_i, NAG_1} & \dots & MK_{ONS_i, NAG_j} \end{bmatrix}$$

Repeated Matching Algorithmus

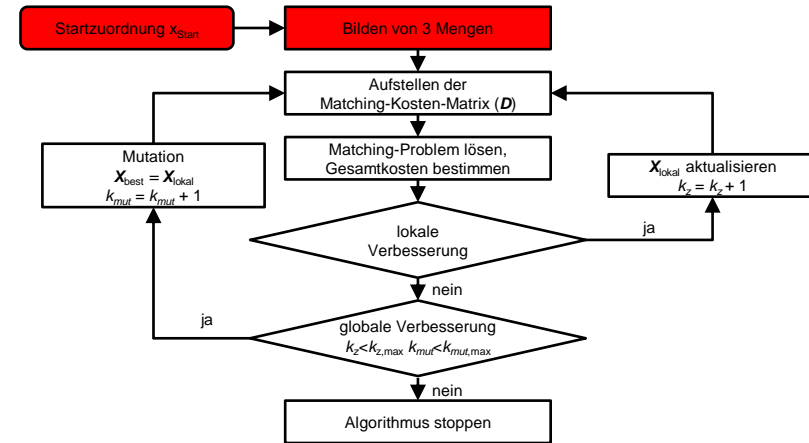
- Auswerten der Startzuordnung
- Aufstellen der 3 Mengen
- Festlegen von möglichen Matchings (Nachbarschaftssuche)



$$L_1 = \{K_2, K_4, K_7\}$$

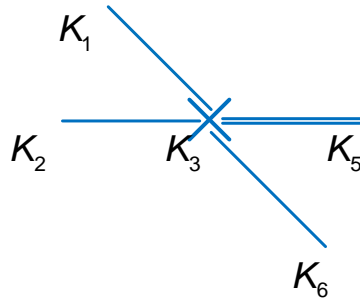
$$L_2 = \{ \}$$

$$L_3 = \left\{ \begin{array}{l} (K_1, [1]), (K_3, [2, 3, 4, 5]) \\ (K_5, [6, 7]), (K_6, [8]) \end{array} \right\}$$

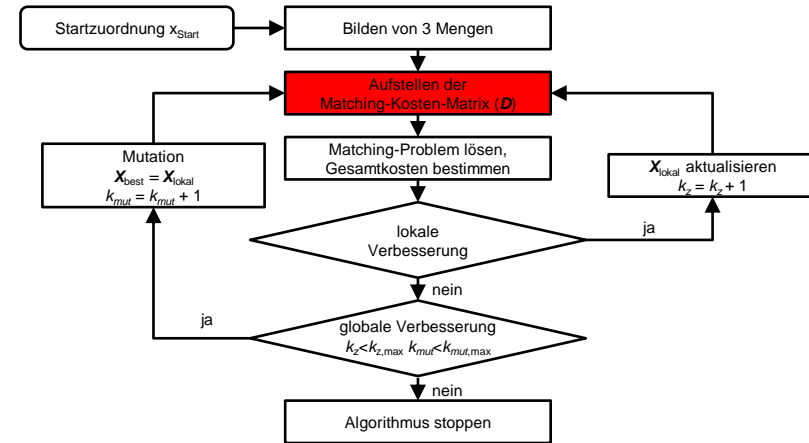


- | | | |
|--------------------------------------|--|----------------------|
| ○ mögliche ONS oder KVS | — — Verstärkungsleitung | ● KVS |
| ✗ eröffnete ONS | — NAG
(ohne Darstellung der NA, Nr. siehe Bild 1) | ↔ Mögliche Matchings |
| — die Farben stellen Zuordnungen dar | | |

Repeated Matching Algorithmus



als Beispiel: $(K_3, [1, 2, 3, 4, 5])$



- Aufbau der Kostenmatrix D ,

Dimension: $(n_1+n_2+n_3) \times (n_1+n_2+n_3)$

$$D = \begin{bmatrix} [L_1 \leftrightarrow L_1] & [L_1 \leftrightarrow L_2] & [L_1 \leftrightarrow L_3] \\ [L_2 \leftrightarrow L_1] & [L_2 \leftrightarrow L_2] & [L_2 \leftrightarrow L_3] \\ [L_3 \leftrightarrow L_1] & [L_3 \leftrightarrow L_2] & [L_3 \leftrightarrow L_3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1] & [2]' & [4]' \\ [2] & [3] & [5]' \\ [4] & [5] & [6] \end{bmatrix}$$

- Lediglich 6 der 9 Untermatrizen müssen durch Netzberechnung ermittelt werden

Berechnung der MK-Matrix (1)

■ Block 1 [$L_1 \leftrightarrow L_1$]

Matching nicht eröffneter Transformatoren

$$d_{r,s} = \begin{cases} \infty & \text{falls } r \neq s \\ 0 & \text{falls } r = s \end{cases}, \text{ mit } i, j \in L_1, r = L_1(i) \text{ und } s = L_1(j)$$

■ Block 2 [$L_1 \leftrightarrow L_2$]

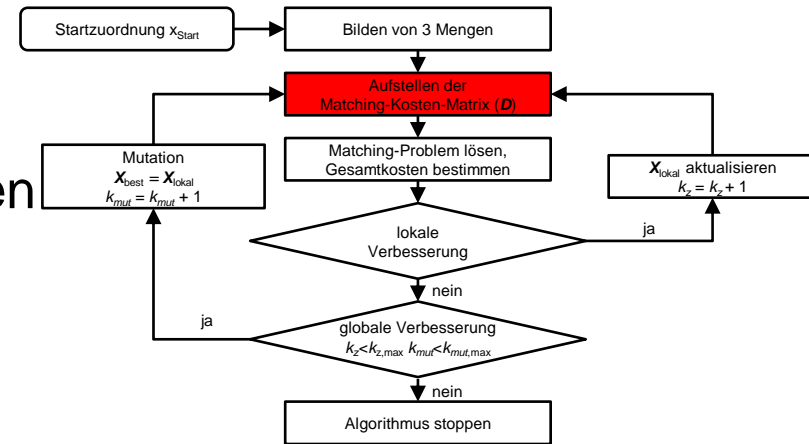
Nicht zugewiesene NAG mit nicht eröffneter ONS

$$d_{n_1+r,s} = \begin{cases} f_i + c_{ij} & \text{falls } b_{i,\max} \geq \|g_s \cdot a_j\|_{\max \rightarrow s} \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}, \text{ mit } i \in L_1, j \in L_2, r = L_1(i) \text{ und } s = L_2(j)$$

■ Block 3 [$L_2 \leftrightarrow L_2$]

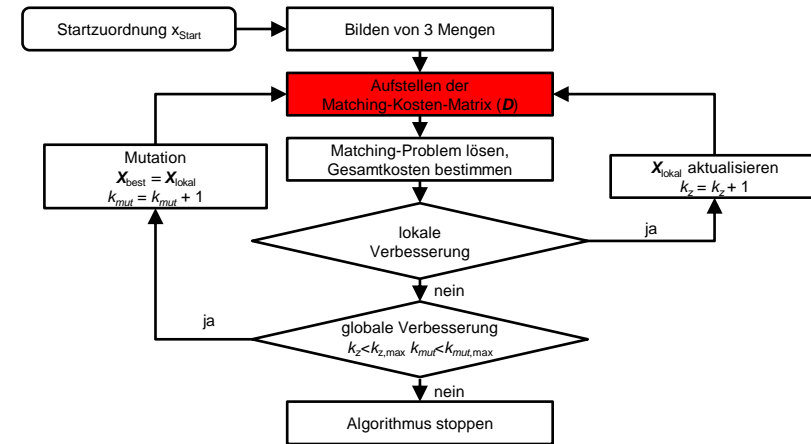
Nicht zugewiesene NAG mit nicht zugewiesener NAG

$$d_{n_1+r,n_1+s} = \begin{cases} \infty & \text{falls } r \neq s \\ 2M & \text{falls } r = s \end{cases}, \text{ mit } i, j \in L_2, r = L_2(i) \text{ und } s = L_2(j)$$



Berechnung der MK-Matrix (2)

- Block 6 [$L_3 \leftrightarrow L_3$]
Matching von ONS inkl.
zugewiesener NAG
- Unterscheidung von 2 Fällen
 - Optimierte Aufteilung der NAG über Versorgungskostenmatrix
 - Ein Standort übernimmt alle NAG
(in Frage kommen alle ONS im Versorgungsgebiet)



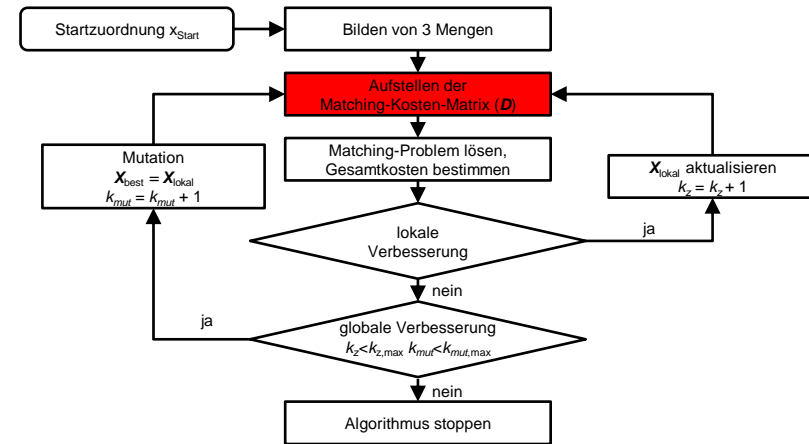
Berechnung der MK-Matrix (3)

■ Block 4 [$L_3 \leftrightarrow L_1$]

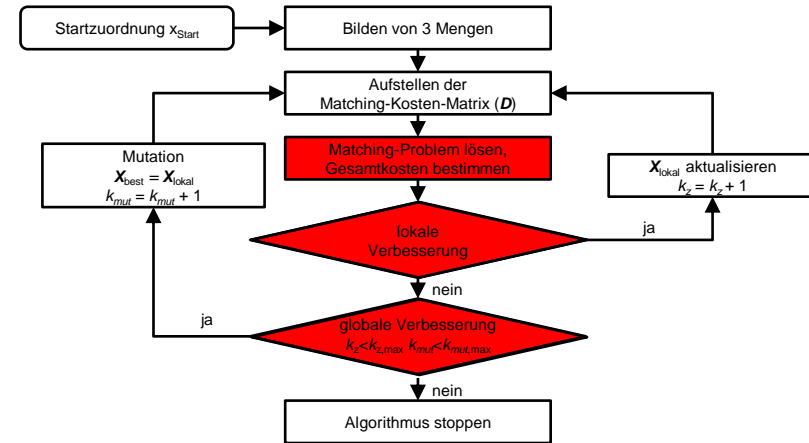
Matching von ONS inkl. zugewiesener
NAG mit nicht eröffneter ONS
Reduktion auf alle ONS die im
Versorgungsgebiet liegen

■ Block 5 [$L_3 \leftrightarrow L_2$]

Matching von ONS inkl. zugewiesener NAG mit nicht versorgter NAG
Reduktion auf alle benachbarten ONS



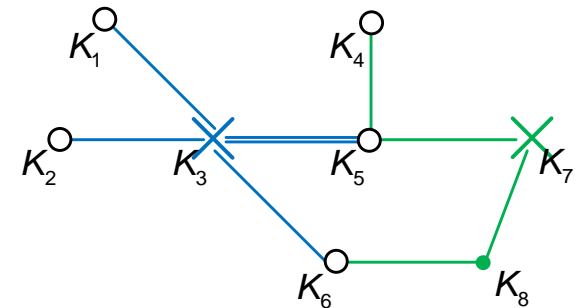
Repeated Matching Algorithmus



- Auswahl der neuen Matchings durch Optimierungsproblem

$$k_{\text{Matching}} = \min \left(\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} d_{ij} z_{ij} \right) = \min(\mathbf{D} \circ \mathbf{Z})$$

- Randbedingung: Symmetrische Lösung der Zuordnungsmatrix \mathbf{Z}
- Bildung der neuen Mengen L'_1, L'_2 und L'_3
- Nächste Iterationsschleife.....



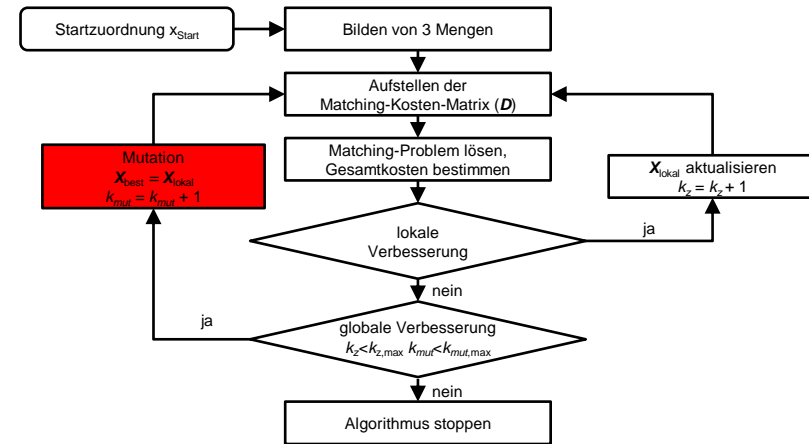
$$L_3 = \left\{ (K_3, [1, 2, 3, 4, 5]), (K_6, [6, 7, 8]) \right\}$$

Mutationen

- Verhinderung der Konvergenz in einem lokalen Optimum

- Vier Mögliche Ansätze:

1. Zufallszahl $\alpha \in [0,1]$ für jede Zuordnung $(i, C) \in L_3$, Zufallszahl $\beta \in [0,1]$ für jede NAG dieser Zuordnung. Falls $\beta \leq \alpha$ wird diese NAG entfernt
2. Wie 1., jedoch eine Zufallszahl $\alpha \in [0,1]$ für alle Zuordnung $(i, C) \in L_3$
3. Von einer Ortsnetzstation in L_3 werden alle NAG entfernt, entfernte Hausanschlüsse in L_2 wandern in L_2
4. Auftrennen von NAGs im Grenzbereich von zwei Stationen



Agenda

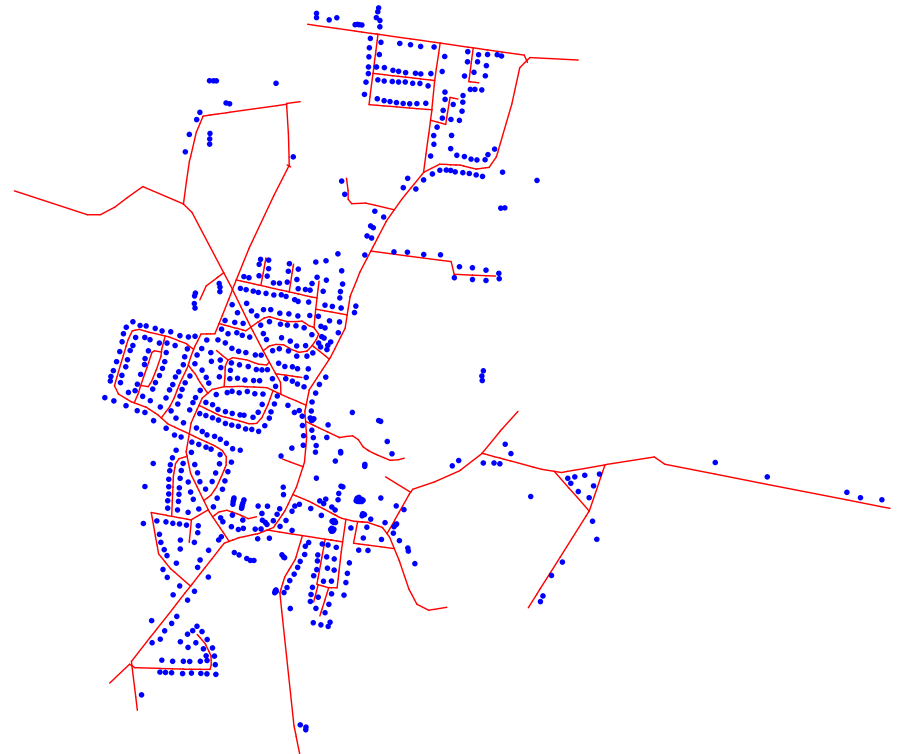
- Einleitung
- Veränderungen der Versorgungsaufgabe
- Aufbau von Niederspannungsnetzen
- Automatisierte Modellbildung von Niederspannungsnetzen
- Optimierte Planung von Niederspannungsnetzen
- Repeated-Matching-Algorithmus
- Anwendung der optimierten Planung
- Zusammenfassung und Ausblick

Anwendung

- Ausgangsnetz
 - 715 Hausanschlüsse
 - 14,28 km Strang-Leitung

- Grüne Wiesen Planung
für 3 kW/HA und ± 5 kW/HA

- Ausbauplanung für
3 kW/HA auf ± 5 kW/HA



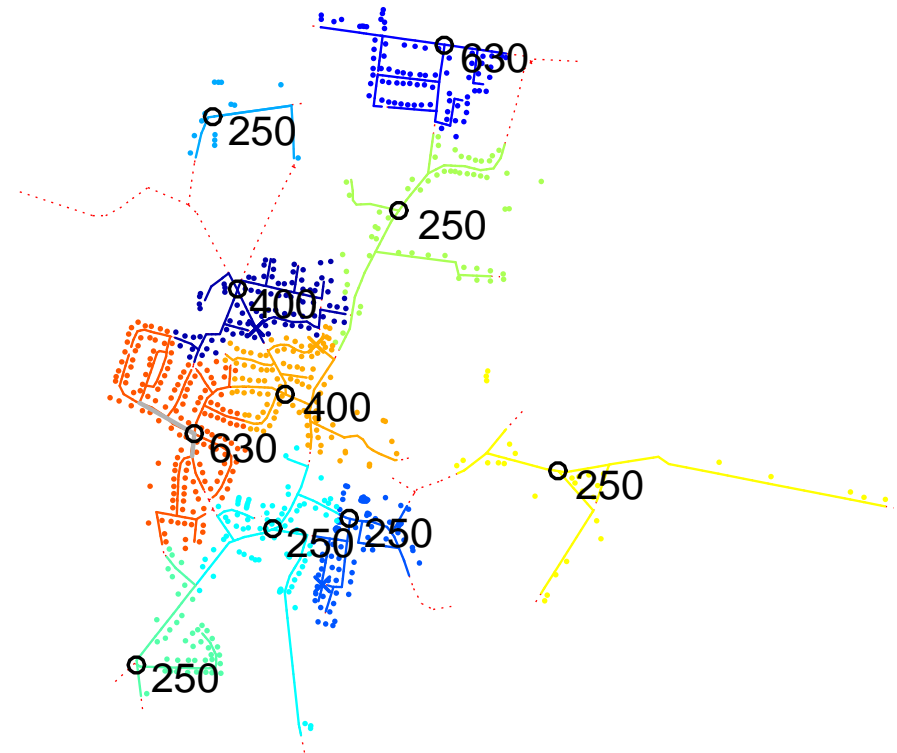
Berücksichtigte Kosten (pauschale Werte)

	Bezeichnung	Investitionen in €	jährliche Kosten (Instandhaltung) in €
Betriebsmittel	Kabel 240 mm ² (pro km)	6000	200
	Transformator 250 kVA konv	6750	125
	Transformator 400 kVA konv	8250	125
	Transformator 630 kVA konv	11250	125
	Transformator 250 kVA rONT	18750	250
	Transformator 400 kVA rONT	20250	250
	Transformator 630 kVA rONT	23250	250
	Gebäude ONS mit Einbindung MS	30000	-
sonstiges	Netzverluste		60 € / MWh
	Arbeitsverlustfaktor ϑ_W konv		0,178
	Arbeitsverlustfaktor ϑ_W rONT		0,154

Anwendung: Grüne Wiese Planung 3 kW/HA ohne rONT

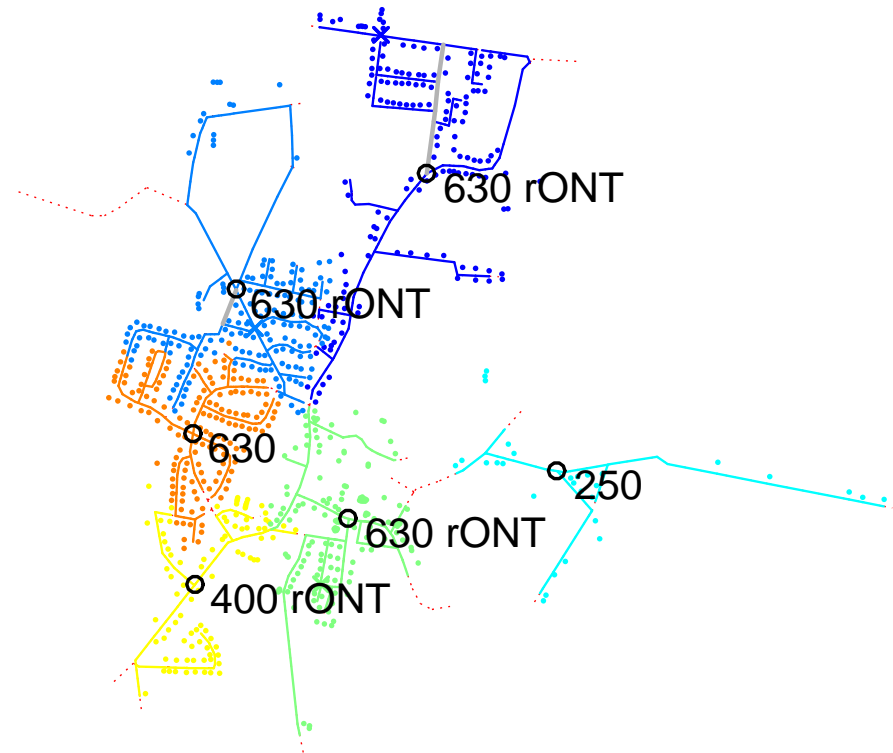
- im weitläufigen Bereich kleinere Stationen
- 10 ONS
- 450 m Verstärkungsleitung

- Anzahl der ONS direkt abhängig von Grabungskosten und Stationskosten



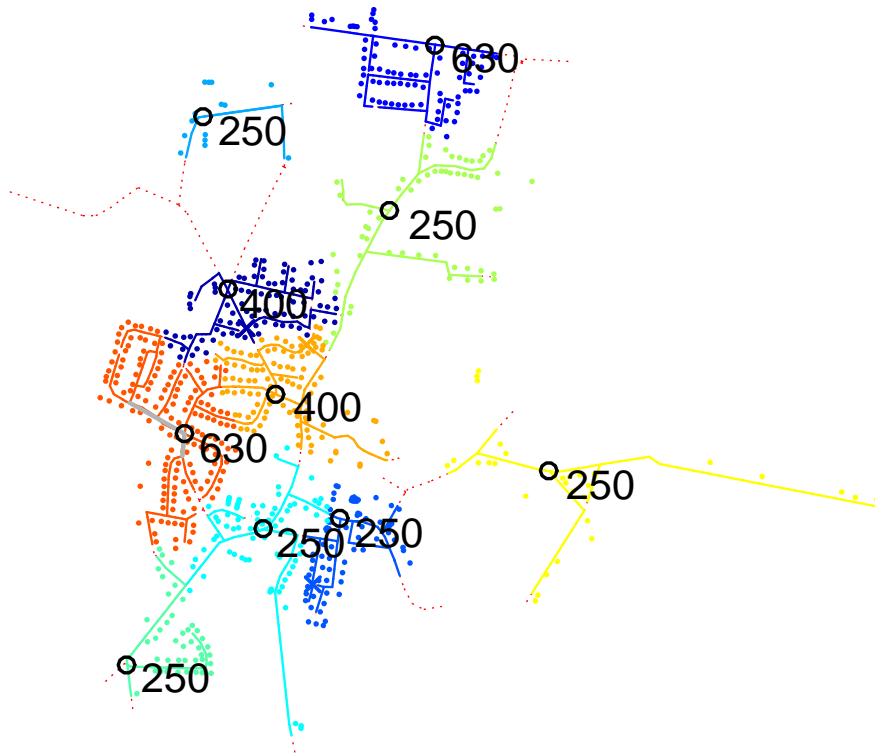
Anwendung: Grüne Wiese Planung 3 kW/HA

- Zusammenfassung von Stationsstandorten durch rONT
 - 6 ONS ausreichend
 - davon 4 rONT
 - 443 m Verstärkungsleitung
-
- große ONS werden im Vergleich zu kleinen ONS bevorzugt aufgestellt



Anwendung: Ausbauplanung von 3 kW auf 5 kW/HA

- Stationsanzahl (10) kann konstant bleiben
- davon 5 rONT | 1,16 km Verstärkungsleitung

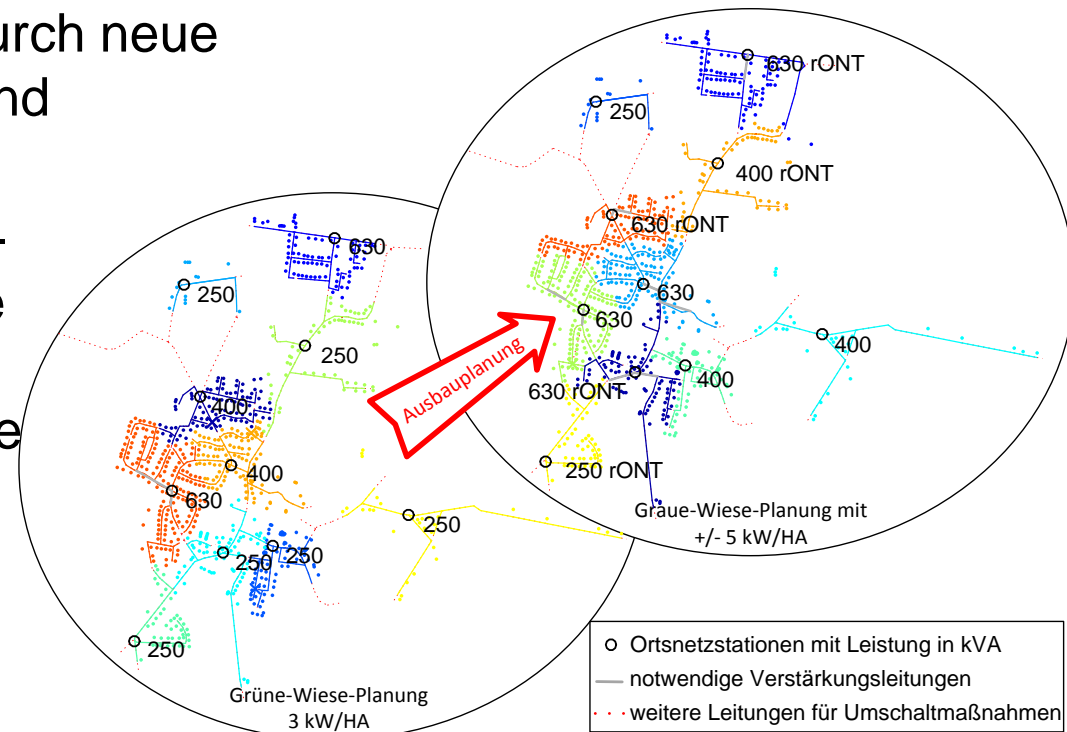


Agenda

- Einleitung
- Veränderungen der Netzkunden
- Aufbau von Niederspannungsnetzen
- Optimierte Planung von Niederspannungsnetzen
- Anwendung der optimierten Planung
- Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Große Veränderungen bei den Netzkunden (PV, Wärmepumpen sowie E-KFZ)
- Umfangreiche Stellgrößen durch neue Technologien in der Mittel- und Niederspannungsebene
- Minimierung der Netzbau-
maßnahmen durch Synergie
effekte bei der Betrachtung
ganzer Netzbereiche / Städte
- Strategisch günstige ONS-
Standorte im NS-Netz
vorhanden
- **Keep it simple, be efficient!**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Dipl.-Ing. Gerrit Schlömer

Leibniz Universität Hannover

Institut für Elektrische Energiesysteme

Fachgebiet Elektrische Energieversorgung

Appelstraße 9A

30167 Hannover

Tel: +49 511 762 2808

Fax: +49 511 762 2369

E-Mail: schloemer@ifes.uni-hannover.de

