

# EINE HEURISTIK ZUR UMBAUPLANUNG VON NIEDERSPANNUNGSNETZEN GANZER ORTSCHAFTEN

Gerrit SCHLÖMER\*, Lutz HOFMANN

Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES),  
Appelstraße 9a, 30167 Hannover, schloemer@ifes.uni-hannover.de,  
<http://www.ifes.uni-hannover.de>

**Kurzfassung:** In diesem Beitrag wird gezeigt, wie klassische logistische Planungsfragen (Ware-House-Location-Problem) auf Fragestellungen zur Optimierung von Niederspannungsnetzen (NS-Netzen) angewendet werden können. Zunächst wird das grundlegende Verfahren der Heuristik erläutert und im Anschluss wird die Anwendung anhand eines Beispiels für ein NS-Netz dargestellt. Das Ziel der Heuristik ist die Ermittlung von Stationsstandorten, deren Art sowie die Lage eventuell notwendiger Verstärkungsleitungen.

**Keywords:** Optimierung, Niederspannung, rONT, Repeated-Matching-Algorithmus

## 1 Einleitung

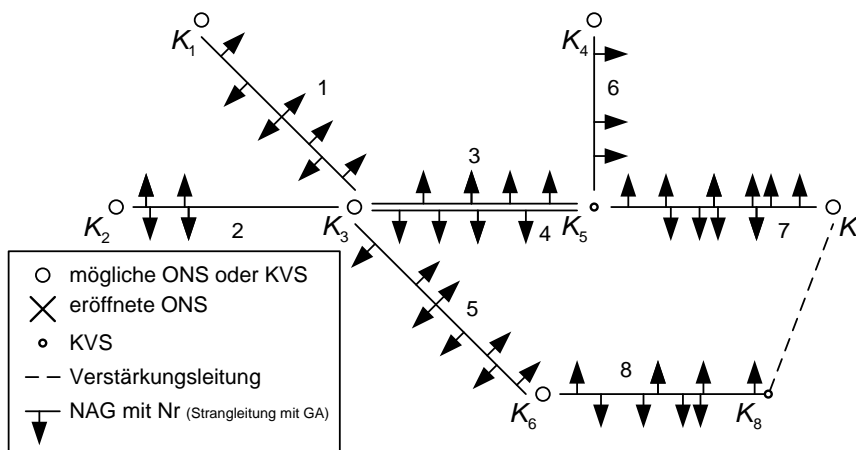
Eine zunehmend dezentralisierte elektrische Energieversorgung und eine weitere Elektrifizierung bisheriger fossiler Energieverbraucher (wie z. B. durch die weitere Einführung von Elektrofahrzeugen (E-KFZ) oder Wärmepumpen (WP)) stellt die Verteilnetzbetreiber vor große Herausforderungen: In vielen Netzen wird es infolge der dezentralen Einspeisungen und größeren Verbrauchslasten zu Spannungsbandverletzungen und Betriebsmittelüberlastungen kommen, sodass Netzverstärkungsmaßnahmen notwendig werden, wie der massive Photovoltaikzubau in Deutschland bereits gezeigt hat. Die Hauptursache ist, dass Energieversorgungsnetze gerade in den unteren Netzebenen in der Vergangenheit mit stark fallenden Gleichzeitigkeitsfaktoren [1] geplant worden sind und die neuartigen Lasten zunehmend einen Gleichzeitigkeitsfaktor von eins aufweisen. Durch Smart-Grid-Anwendungen können in Zukunft viele Leistungsspitzen reduziert werden, dennoch muss bei einer vollelektrischen Versorgung der Haushalte ausreichend Leistung zur Verfügung stehen, um die Gebäude bei niedrigen Außentemperaturen zu beheizen, E-KFZ zu laden und den Warmwasserbedarf zu decken.

Aufgrund der oftmals schlechten Datenlage bezüglich der Betriebsmittel und Topologie in der NS-Ebene, der vielen Möglichkeiten zur Auswahl, räumlichen Positionierung und Verschaltung der Betriebsmittel, müssen Verfahren entwickelt werden, die den Netzplaner entlasten und Lösungen für eine optimierte NS-Netzplanung vorschlagen. Dies ist vor dem Hintergrund umso dringlicher, als dass im Laufe der letzten Jahre durch die Einführung weiterer Betriebsmittel für das NS-Netz (Ortsnetz) wie aktive Spannungsregler, der Freiheitsgrad des Netzplaners und somit der Lösungsraum des Optimierungsproblems noch einmal deutlich gewachsen sind [2].

Häufig wird beim Ausbau oder bei der Verstärkung von NS-Netzen zur Vereinfachung nur der Teil des Ortsnetzes betrachtet, der von der Maßnahme betroffen ist. Dies führt allerdings dazu, dass Vorteile, die aus der Betrachtung des ganzen Netzgebietes resultieren, d. h.

unter Einbeziehung der benachbarten NS- und des überlagerten Mittelspannungsnetzes (MS-Netz), nicht genutzt werden können. Eine manuelle Berechnung unterschiedlicher Netzausbauvarianten und Trennstellenfestlegungen für größere Ortschaften oder ganze Stadtteile ist gerade aufgrund der Problemgröße bisher oftmals zu zeitaufwendig. Bei der Entwicklung eines Optimierungsansatzes zur Unterstützung der Netzplaner ist ferner entscheidend, dass nicht nur eine Grüne-Wiese-Planung durchgeführt werden kann, sondern dass auch - ausgehend von den vorhandenen Betriebsmitteln - eine Optimierung, wie z. B. ein verlustminimaler Betrieb oder eine Netzverstärkung mit minimalen Investitionen, durchgeführt werden kann. Dieser Ansatz wird im Folgenden als Graue-Wiese-Planung bezeichnet.

Grundlage des Verfahrens ist folglich ein GIS-Datensatz des Ortsnetzes. Entscheidende Informationen sind, wo die einzelnen Gebäudeanschlüsse (GA) positioniert und von welchen Belastungsannahmen und entsprechenden Gleichzeitigkeitsfaktoren ausgegangen werden kann. Zur Berechnung der Leistungsflüsse und der Kurzschlussleistungen sind Informationen zu den vorhandenen Leitungen und Transformatoren notwendig. Die GA werden in der Regel auf die ein- oder beidseitig verlegte Straßenleitung aufgemufft und können daher nicht einzeln, sondern nur als Gruppe einer Station zugeordnet werden. Diese Gruppe wird im Folgenden als Netzanschlussgruppe (NAG) bezeichnet. Zur Berücksichtigung möglicher Umschaltmaßnahmen müssen die Positionen der Kabelverteilerschränke (KVS) hinterlegt werden. Für den Standort der Ortsnetzstation (ONS) ist entscheidend, welche Standorte räumlich möglich sind und welche Kosten für das Grundstück, die Errichtung oder Ertüchtigung des Stationsgebäudes sowie die Einbindung in die MS- und NS-Ebene entstehen. Bild 1.1 zeigt den Aufbau eines exemplarischen Ortsnetzes mit möglichen ONS-Standorten.



**Bild 1.1** Darstellung eines exemplarischen Ortsnetzes

## 2 Methodik der Standortoptimierung

Die Planung und Optimierung von Standorten ist ein Teilgebiet des Operations Research. Fokus der Untersuchungen sind in der Regel produzierende Unternehmen, bei welchen die Platzierung einer oder mehrerer Fabriken mit hohen Kosten verbunden ist. Das Ziel der Optimierung unter Einhaltung aller Nebenbedingungen (z. B. Kapazitätsrestriktion) ist es, die Anzahl der Standorte verbunden mit den fixen Investitionen, den Unterhaltungskosten (Lokationskosten) sowie den variablen Transportkosten zwischen Standorten und Kunden

(Allokationskosten) zu minimieren. Nach [4] kann das Facility Location Problem (FLP) nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden. Die Problemstellung wird in diesem Beitrag auf NS-Netze angewendet, wobei ONS, deren Standorte sowie die Zuordnung der NAG bestimmt werden. Der Aufbau von NS-Netzen ist aufgrund der einfachen Schutztechnik und zur eindeutigen Vorgabe der Leistungsflüsse in der Regel unvermascht und die ONS hat eine begrenzte Bemessungsleistung, daher kann die Versorgung von Netzkunden in der NS-Ebene der Problemklasse der Capacitated Facility Location Problem with Single-Sourcing (CFLPSS) zugeordnet werden [13]. Da elektrische Energie prinzipiell ein Produkt ist, kann ferner ein Einproduktmodell verwendet werden.

Das Optimierungsziel des CFLPSS ist die Minimierung der Zielfunktion  $v$  und somit der Gesamtausbaukosten für das Zielszenario, die sich vereinfacht aus den Kosten der Zuordnung der NAG zu den ONS zusammensetzen.

$$v(\text{CFLPSS}) = \min(\mathbf{C} \circ \mathbf{X} + \mathbf{f} \cdot \mathbf{y}) = \min\left(\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I} f_i \cdot y_i\right) \quad (2.1)$$

Die Versorgungskostenmatrix  $\mathbf{C}$  beschreibt dabei die Barwerte der Versorgungskosten jeder NAG  $i$  von einer möglichen ONS  $j$  und die Inzidenzmatrix  $\mathbf{X}$  die tatsächlichen Zuordnungen. Der Vektor  $\mathbf{f}$  beschreibt die Investitionen und Barwerte der Unterhaltungskosten jeder möglichen ONS und der Vektor  $\mathbf{y}$  die tatsächlich ausgewählten ONS. Diese werden im Folgenden als errichtet bezeichnet. Durch die folgenden Nebenbedingungen wird sichergestellt, dass jede NAG versorgt wird (Gl. (2.2)), keine Station in einem der Szenarien  $\mathbf{s}$  durch die Belastung der NAG  $\mathbf{a}$  gewichtet mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor  $\mathbf{g}$  mit mehr als der Nennleistung  $\mathbf{b}$  belastet (Gl. (2.3)) wird und die zugeordneten ONS errichtet sein müssen (Gl. (2.4)). Gleichung (2.5) legt fest, dass es sich bei der Optimierung um ein ganzzahliges, lineares Optimierungsproblem handelt.

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} \|a_j g_s x_{ij}\|_{\max \rightarrow s} \leq b_i \quad \forall i \in I \quad (2.3)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2.4)$$

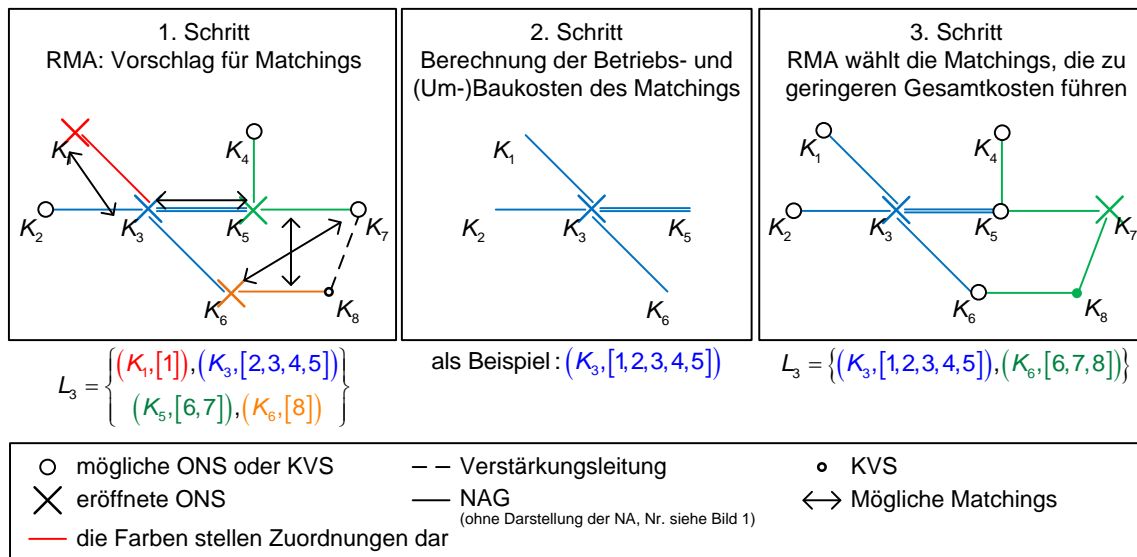
$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2.5)$$

Zur Lösung des FLP gibt es unterschiedliche Ansätze (siehe z. B.: [3], [8]-[13]), in diesem Fall wird allerdings auf den Repeated Matching Algorithmus (RMA) aus [3] zurückgegriffen, da sich diese Variante besonders einfach und anschaulich auf NS-Netze anwenden lässt, wie im Folgenden beschrieben wird.

## 2.1 Repeated Matching Algorithmus (RMA)

Das Vorgehen des entwickelten Algorithmus auf Grundlage von [3] ist in Bild 2.1 anhand des Beispiels aus Bild 1.1 exemplarisch dargestellt. Der Algorithmus basiert auf dem Vergleich der Kosteneinsparung durch Zuordnung oder Änderung der Zuordnung von NAG zu ONS (im Folgenden als Matching bezeichnet), wobei durch eine Optimierung die Auswahl der Zuordnungen vorgenommen wird. Die vielen Vergleiche unterschiedlicher Zuordnungsmöglich-

keiten sind parallelisierbar und Rechenzeitvorteile können gewonnen werden, indem die Vergleiche auf das Ergebnis einer vorherigen Nachbarschaftssuche beschränkt werden. Um eine Konvergenz in einem lokalen Optimum zu verhindern, wird durch Auftrennen und Neuordnung bestehender Zuordnungen der Lösungsraum erweitert.



**Bild 2.1** Exemplarisches Vorgehen der Heuristik

$K_i$  bezeichnet die Menge aller Lösungen in einem Rechenschritt. Falls eine oder mehrere NAG  $j$  einer ONS  $i$  zugeteilt werden, wird dies als Matching  $(i, N) \in K$  bezeichnet, wobei die Menge  $N$  alle zugeordneten NAG zur ONS beinhaltet. Es wird definiert, dass  $(i, N) \in K$  zulässig ist, falls Gl. (2.3) erfüllt ist. Es lassen sich folglich drei Mengen bilden:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \{i \mid (i, N) \notin L_3\} && | \text{ nicht eröffnete ONS} \\
 L_2 &= \bigcup_{(i,C) \notin L_3} N && | \text{ nicht zugewiesene NAG} \\
 L_3 &= \{(i, N)\} && | \text{ eröffnete ONS mit zugeordneten NAG}
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Die Menge  $L_1$  enthält alle ONS, die nicht errichtet sind.  $L_2$  enthält alle NAG, die keiner ONS zugeordnet sind.  $L_3$  enthält alle errichteten ONS mit den jeweils zugeordneten NAG.  $n_1, n_2$  und  $n_3$  sind die jeweiligen Kardinalitäten der Mengen  $L_1$  bis  $L_3$ . Die Barwerte einer Zuordnung - und somit die Barwerte der Lösung mit Ausnahme des Bestrafungsterms  $\mu \cdot n_2$  für nicht versorgte NAG - betragen bei vereinfachter drehmomentorientierter Betrachtung (siehe Abschnitt 2.2):

$$B_{\text{Lösung}} = \mu \cdot n_2 + \mathbf{f} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{C} \circ \mathbf{X} = M \cdot n_2 + \sum_{i \mid (i,C) \in L_3} f_i + \sum_{\{(i,j) \mid (i,C) \in L_3, j \in C\}} c_{ij}
 \tag{2.7}$$

Im RMA werden aus dem Vergleich möglicher neuer Zuordnungen der Mengen  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  diejenigen ausgewählt, durch die die Gesamtkoste - sofern möglich - am größten gesenkt werden. Falls eine Änderung vorgenommen wird, entstehen neue Mengen  $L'_1, L'_2$  und  $L'_3$ . Durch die Wahl eines hinreichend großen Wertes für  $\mu$  werden die Gesamtkosten dazu

neigen, die Anzahl der Elemente in  $L_2$  auf null zu verringern, sodass Nebenbedingung (2.2) eingehalten wird [13].

Um zu verhindern, dass die Heuristik in lokalen Optima konvergiert, wird ähnlich wie bei genetischen Algorithmen eine Mutation durchgeführt. Innerhalb der Mutationen werden Zuweisungen von NAG zu ONS wieder aufgetrennt, sodass diese wieder zu der Menge  $L_2$  zugeordnet werden. Als besonders zielführend hat sich gezeigt, die NAG zu trennen, die an den Grenzbereichen zwischen den einzelnen Versorgungsbereichen der ONS liegen.

Der RMA wird erneut so lange ausgeführt, bis ein Kriterium zum Beenden erfüllt ist. Zum einen wird hierzu die Anzahl der maximalen Gesamt- und Mutationsschritte ( $k_z, k_{mut}$ ) und zum anderen die Verbesserung der Gesamtkosten unter einen festgelegten Wert ausgewertet. Bild 2.2 veranschaulicht den Ablauf der RMA in einem Flussdiagramm.

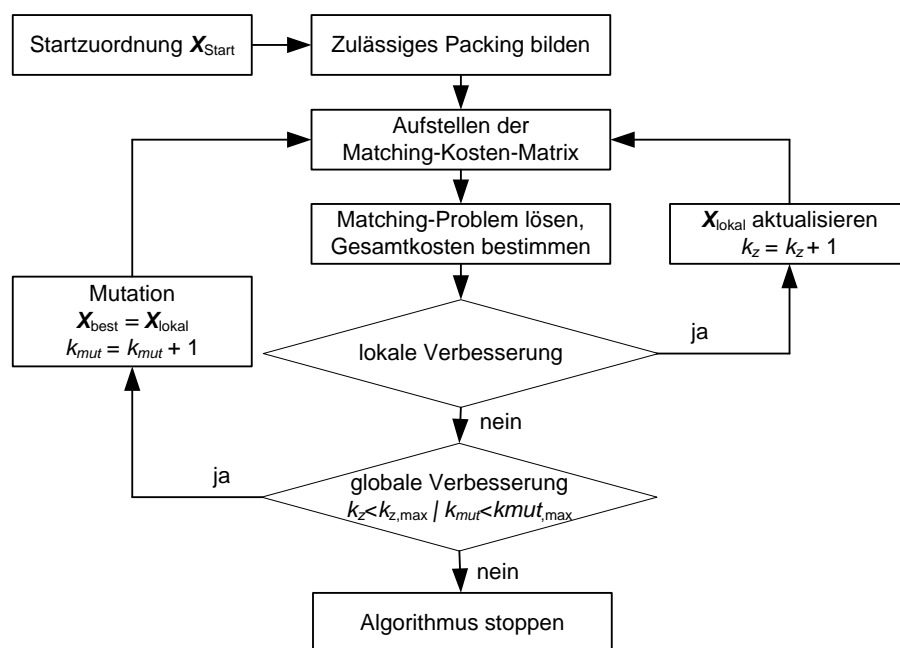


Bild 2.2 Flussdiagramm der Repeated Matching Algorithmus

## 2.2 Aufbau der Versorgungskostenmatrix $C$

Eine einfache Variante zur Berechnung der Versorgungskostenmatrix  $C$  ist das Drehmomentverfahren. Dazu wird das Hadamard-Produkt [5] aus der Entfernungsmatrix  $E$  mit der Supremumsnorm [6] über die  $s$ -Dimension, das heißt der maximalen Spitzenlast der Netzanschlussgruppenlastmatrix  $A$  gewichtet mit dem Gleichzeitigkeitsfaktor  $G$ , gebildet (punktweise Multiplikation der Entfernung bzw. Impedanz zwischen ONS und NAG mit der maximalen Last- oder Einspeiseannahmen).

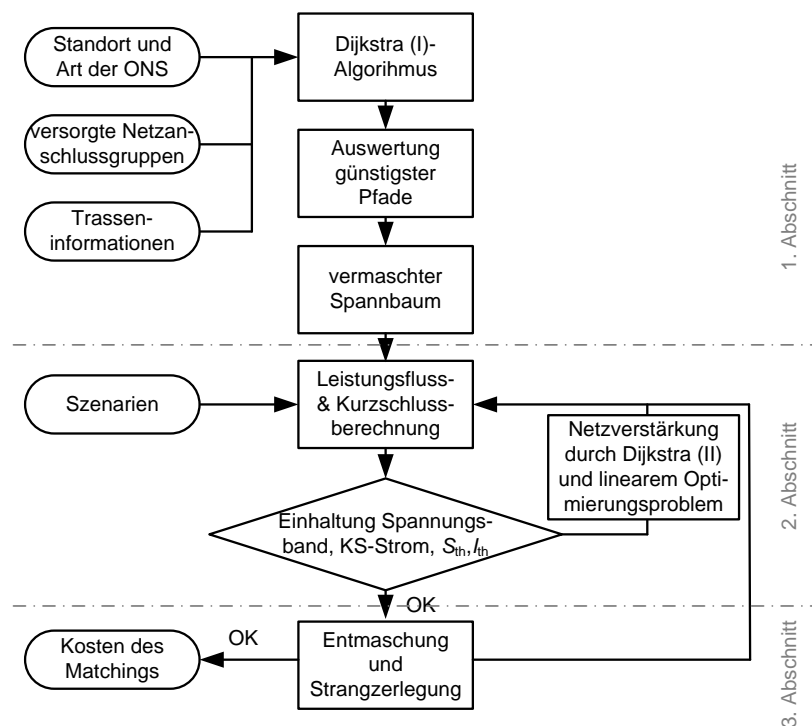
$$C = E \circ \|G \circ A\|_{\max \rightarrow s} \quad (2.8)$$

Das Drehmomentverfahren wird häufig für einfache Betrachtungen in der Logistik [7] oder einfache Netzberechnungen verwendet. Nachteilig für diese Variante ist, dass die Größenordnung der Zahlen nicht im Bereich des späteren Lösungsraumes liegt und keine Leistungsflussberechnung zugrunde liegt. Daher besteht eine zweite Möglichkeit darin, durch

Anwendung einer separaten Berechnung der Matchingkosten (MK) die Kosten der Zuordnung für jede NAG zu jeder ONS zu ermitteln, wobei dieses deutlich mehr Rechenzeit erfordert.

### 2.3 Ermittlung der Matchingkosten

Für jedes zu überprüfende Matching muss eine Berechnung der MK erfolgen, was in diesem Beitrag nur stark vereinfacht dargestellt werden kann (siehe Bild 2.3). Im ersten Abschnitt wird mithilfe des Dijkstra-Algorithmus [14] auf Basis der günstigsten Ausbautrassen auf Grundlage der versorgten NAG und der ONS ein Spannbaum aufgestellt. Mit diesem Spannbaum kann eine erste Leistungsfluss- und Kurzschlussstromberechnung [15] durchgeführt werden. Mithilfe eines weiteren Dijkstra-Algorithmus werden anschließend die Impedanzen zwischen den Knoten mit Spannungsband- und Kurzschlussstromproblemen und der ONS sowie durch unterschiedliche Trassengewichtungen mehrere mögliche Ausbautrassen bestimmt. Durch die Überführung in ein Gleichungssystem werden im Folgenden auf Basis eines ganzzahligen, linearen Optimierungsproblems die Ausbaustrecken ermittelt, sodass die geforderten Spannungs-, Kurzschluss- und Auslastungsbedingungen eingehalten werden.



**Bild 2.3** Übersicht über die Funktion zur Berechnung der MK

Im dritten Abschnitt erfolgt eine Zerlegung des Netzes in einzelne Netzstrahlen. Dazu werden zum einen von zwei Netzstrahlen gespeiste Netzanschlussgruppen heuristisch aufgetrennt und zum anderen von zwei Netzstrahlen gespeiste Knoten auf eine Speisung reduziert. Sollten Verstärkungsleitungen parallel zu Netzanschlussgruppen liegen, werden in dem folgenden Beispiel die Netzanschlussgruppen nicht auf einer Seite geöffnet, da ansonsten die Kurzschlussleistung am Ende der Leitung zu sehr reduziert werden würde.

### 2.3.1 Aufbau der Matchingkosten-Matrix $D$

Für jedes mögliche Matching muss der Kostenkoeffizient  $d_{ij}$  für die Zielfunktion nach Abschnitt 2.3 berechnet werden. Die Dimension der zweidimensionalen Kostenmatrix  $D$  verändert sich dynamisch im Verlauf des Algorithmus solange sich die Menge  $L_3$  verändert, entspricht aber in jeder Richtung der Summe von  $n_1 + n_2 + n_3$ . Für Matchings verschiedener Elemente aus den Mengen  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  müssen unterschiedliche Methoden angewendet werden, um die MK zu bestimmen. Die Matrix  $D$  ist symmetrisch und besteht aus neun Untermatrizen. Aufgrund der Symmetrie müssen nur sechs Untermatrizen berechnet werden. Die Notation  $[L_a \leftrightarrow L_b]$  wird verwendet, um Matchings zwischen den Menge  $L_a$  und  $L_b$  zu kennzeichnen.

$$D = \begin{bmatrix} [L_1 \leftrightarrow L_1] & [L_1 \leftrightarrow L_2] & [L_1 \leftrightarrow L_3] \\ [L_2 \leftrightarrow L_1] & [L_2 \leftrightarrow L_2] & [L_2 \leftrightarrow L_3] \\ [L_3 \leftrightarrow L_1] & [L_3 \leftrightarrow L_2] & [L_3 \leftrightarrow L_3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1] & [2]' & [4]' \\ [2] & [3] & [5]' \\ [4] & [5] & [6] \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

### 2.3.2 Block 1: $[L_1 \leftrightarrow L_1]$

Ein Matching einer nicht errichteten ONS mit einer anderen nicht errichteten ONS ist nicht zulässig, sodass die Kosten hierfür auf  $\infty$  gesetzt werden. Ein Self-Matching (eine nicht errichtete ONS mit sich selbst) erzeugt Kosten von 0, solange der ONS keine NAG zugeordnet werden. Es ergeben sich folgende MK für Block 1:

$$d_{r,s} = \begin{cases} \infty & \text{falls } r \neq s \\ 0 & \text{falls } r = s \end{cases}, \text{ mit } i, j \in L_1, r = L_1(i) \text{ und } s = L_1(j) \quad (2.10)$$

### 2.3.3 Block 2: $[L_2 \leftrightarrow L_1]$

Die Zuordnung einer nicht zugeordneten NAG zu einer nicht errichteten ONS ist zulässig, sofern die Nennleistung des Transformators dabei nicht durch die Leistung der zugeordneten NAG überschritten wird.

$$d_{n_1+r,s} = \begin{cases} f_i + c_{ij} & \text{falls } b_{i,\max} \geq \|g_s \cdot a_j\|_{\max \rightarrow s} \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}, \text{ mit } i \in L_1, j \in L_2, r = L_1(i) \text{ und } s = L_2(j) \quad (2.11)$$

Um zu vermeiden, dass an einem geografischen Standort mehrere Transformatoren errichtet werden, wird die Auswertung der Menge  $L_1$  auf den leistungsstärksten Transformator je Standort begrenzt, im Rahmen von Block 4 kann eine Anpassung der Stationsnennleistung vorgenommen werden.

### 2.3.4 Block 3: $[L_2 \leftrightarrow L_2]$

Das Matching einer nicht zugeordneten NAG mit einer anderen nicht zugeordneten NAG ist nicht zulässig, sodass die Kosten hierfür  $\infty$  betragen. Ein Self-Matching ergibt Kosten von  $2\mu$ , da das Matching in der Zielfunktion doppelt gewertet wird.

$$d_{n_1+r,n_1+s} = \begin{cases} \infty & \text{falls } r \neq s \\ 2\mu & \text{falls } r = s \end{cases}, \text{ mit } i, j \in L_2, r = L_2(i) \text{ und } s = L_2(j) \quad (2.12)$$

Um die Anzahl der Berechnungen in den Blöcken 4, 5 und 6 drastisch zu reduzieren, ist es sinnvoll, jeweils nur die Kombinationen zu untersuchen, die sich in räumlicher Nähe zueinander befinden; Kombinationen entfernterer Elemente sind in der Regel deutlich teurer und werden dementsprechend nicht ausgewählt.

### 2.3.5 Block 6: $[L_3 \leftrightarrow L_3]$

Um die MK von zwei Elementen  $(i_1, C_1), (i_2, C_2) \in L_3$  bestimmen zu können, müssen zwei mögliche Fälle betrachtet werden. Im ersten Fall werden die NAG anhand der Versorgungskostenmatrix  $\mathbf{C}$  mithilfe eines linearen Optimierungsproblems auf die beiden Netzstationen aufgeteilt. Im zweiten Fall übernimmt ein Standort alle betrachteten NAG, sofern die Bemessungsleistung des Transformators ausreichend ist. Hierbei kommen alle potenziellen Standorte in räumlicher Nähe der versorgten NAG infrage.

### 2.3.6 Block 4: $[L_3 \leftrightarrow L_1]$

Das Paaren einer eröffneten ONS mit bereits zugeordneten NAG mit einer geschlossenen ONS ist ein Sonderfall von Block 6. Es werden die MK für alle Paarungen berechnet, die infrage kommen. Standorte von bereits eröffneten Stationen werden nicht miteinbezogen.

### 2.3.7 Block 5: $[L_3 \leftrightarrow L_2]$

Bei der Paarung einer eröffneten ONS mit zugeordneten NAG mit einer nicht zugeordneten NAG sind zwei Fälle möglich. Im ersten Fall kann die noch nicht zugeordnete NAG der eröffneten ONS zugeordnet werden, da die Kapazität des Transformators durch die zusätzliche NAG nicht überschritten wird. Im zweiten Fall, falls die Kapazität der ONS nicht ausreicht, um die zusätzliche NAG zu versorgen, werden die NAG mit den höchsten MK wieder von der ONS entfernt.

### 2.3.8 Lösung der Matchingkostenmatrix $\mathbf{D}$

Die MK-Matrix  $\mathbf{D}$  wird mit folgender Zielfunktion gelöst:

$$k_{\text{Matching}} = \min \left( \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} d_{ij} x_{ij} \right) = \min(\mathbf{D} \circ \mathbf{X}) \quad (2.13)$$

Es muss beachtet werden, dass die Ergebnismatrix  $\mathbf{x}$  symmetrisch sein muss. Ferner muss sichergestellt werden, dass nur eine Aktion pro Element von  $\mathbf{D}$  ausgewählt wird.

Im Folgenden wird das entwickelte Verfahren zunächst als Grüne-Wiese-Planung und davon ausgehend als Ausbauplanung auf ein Ortsnetz angewendet.

## 3 Anwendung auf ein Beispielnetz

Bei der Grüne-Wiese-Planung sollen für eine reale Ortschaft optimale Standorte für ONS und Verstärkungsleitungen ermittelt werden. In dem Ortsnetz werden die Strangleitungen (ohne Verstärkungsleitungen) sowie die Positionen der GA und KVS aus dem Netzdatensatz übernommen. Für die weiteren notwendigen Betriebsmittel und deren Instandhaltungskosten werden die in Tabelle 3.1 angegebenen Kosten angenommen. Prinzipiell ermöglicht das RMA-Verfahren individuelle Kosten für jeden Standort und jedes Leitungsstück, der Über-



sicht halber wird aber auf pauschale Werte zurückgegriffen. Als Planungsgrundlagen wird angenommen, dass für konventionelle ONS lediglich ein Spannungsabfall von 4 % und für rONT von 8 % im NS-Netz zugelassen werden. Leitungen dürfen nur bis zum thermisch zulässigen Strom belastet werden, und die NH-Sicherungen werden so ausgewählt, dass gemäß [16] und [17] nach 5 Sekunden der einpolige Fehlerstrom gelöscht wird, wobei mindestens 80 A-Sicherungen ausgewählt werden sollen.<sup>1</sup>

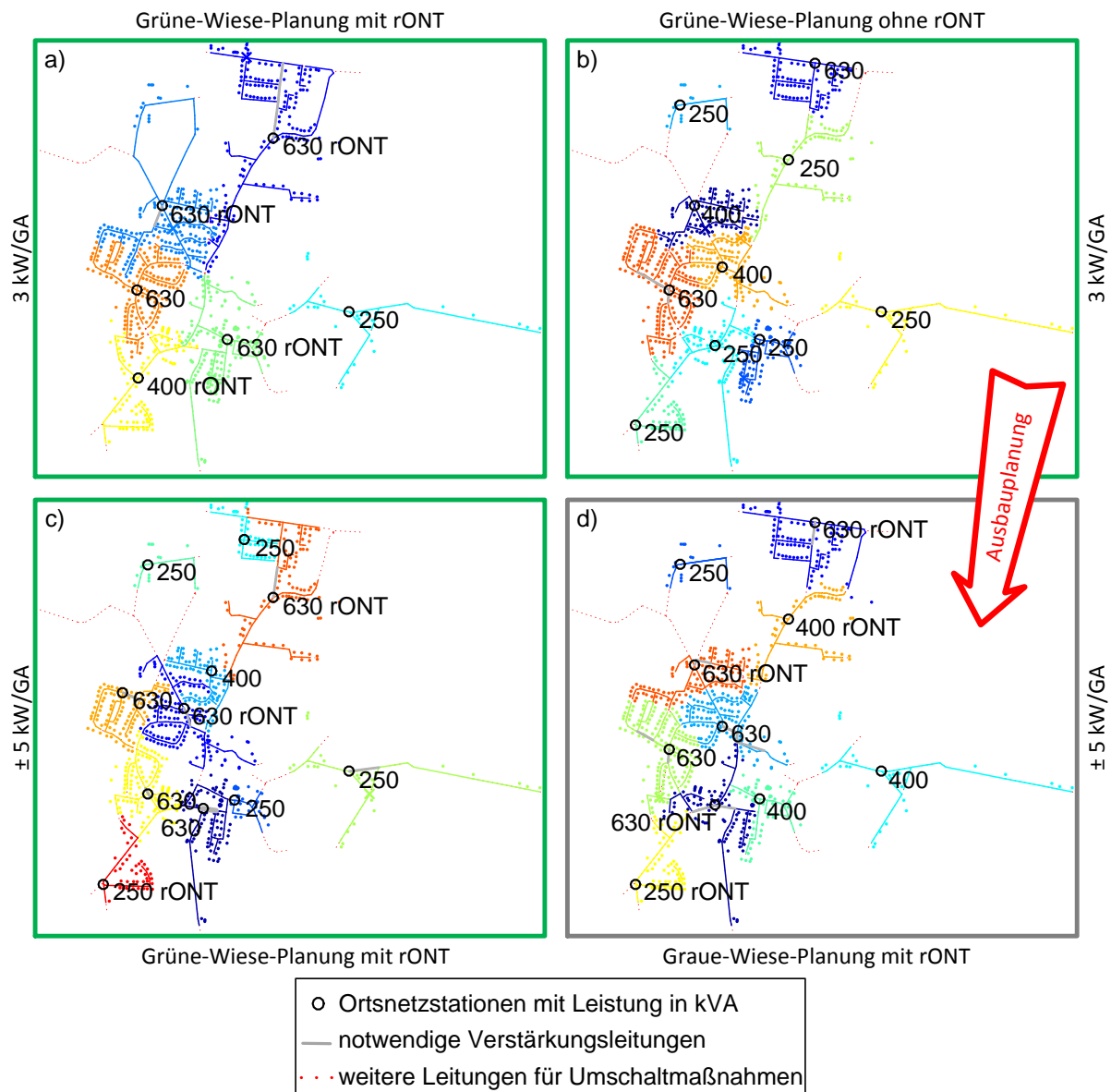
Bild 3.1 zeigt vier Ergebnisse für ein Ortsnetz mit 715 Netzanschlüssen in Niedersachsen. Die beiden oberen Bilder a) und b) zeigen eine Grüne-Wiese-Planung mit und ohne rONT-Einsatz für eine gleichzeitige Spitzenlastabnahme an allen GA von 3 kW. Während in der konventionellen Ausführung 10 ONS erforderlich sind, können bei vollständiger Neuplanung mit rONT-Einsatz 4 ONS eingespart werden. Dabei muss beachtet werden, dass im aktuellen Programmstand noch keine Ausfallrechnungen seitens der ONS berücksichtigt werden. In der zweiten Zeile von Bild 3.1 wird das Szenario von 3 kW auf  $\pm 5$  kW je Netzanschluss erhöht. Dabei ist in Bild c) wiederum eine Grüne-Wiese-Planung gezeigt und in Bild d) das Ergebnis einer Ausbauplanung auf Basis von Bild b). Im Fall der Ausbauplanung wurden keine weiteren ONS eröffnet. Zwei ONS konnten unverändert bleiben, während in vier ONS ein rONT eingebaut wurde. Es zeigt sich allerdings, dass sich die Versorgungsbereiche der einzelnen ONS zum Teil deutlich verlagert haben.

**Tabelle 3.1** Berücksichtigte Kosten

	Bezeichnung	Investitionen in €	jährliche Kosten (Instandhaltung) in €
Betriebsmittel	Kabel 240 mm <sup>2</sup> (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 $\vartheta_W$ konv		0,178
	Arbeitsverlustfaktor $\vartheta_W$ rONT		0,154

Der Vergleich zwischen allen Teilbildern zeigt, dass es aus NS-Sicht mehrere strategisch günstige Standorte für ONS in den Ortschaften gibt, die in allen drei Grüne-Wiese-Planungen ausgewählt werden. Dies sind oftmals Kreuzungen mit weiteren nahen Kreuzungen oder Lastschwerpunkte.

<sup>1</sup> Einige Energieversorger sichern die Kabel standardmäßig mit dem thermisch zulässigen Strom der Kabel ab, dies führt allerdings gerade in ländlichen Bereichen aufgrund der geringen Kurzschlussleistungen zu einem deutlich höheren Leitungsausbau. Als Beispiel kann ein 150 mm<sup>2</sup>-NAYY-Kabel dienen, dass je nach MS-Netzinneimpedanz ab einer Länge von etwa 300 m nicht mehr mit einer 250-A-NH-Sicherung abgesichert werden kann. Viele Online-Videos von dauerhaften Lichtbögen in KVS zeigen die Brisanz dieses einheitlichen Sicherungsansatzes [18].



**Bild 3.1** Unterschiedliche Simulationsergebnisse für einen Ort in Niedersachsen

## 4 Ausblick

Im Moment erfolgt eine Untersuchung, inwiefern die (N-1)-Sicherheit für die Betrachtung der ONS in das Verfahren integriert werden kann. Während in sehr kleinen Netzgebieten, die nur von einer ONS versorgt werden, eine weitere ONS oftmals nicht wirtschaftlich ist, stellt sich beispielsweise bei höherer Kundenanzahl die Frage, ob das Gebiet vorzugsweise durch einen rONT oder zwei konventionelle ONS versorgt werden sollte. Weiterhin problematisch ist die Datenlage vieler Netzbetreiber in der NS-Ebene, hier wird ebenfalls ein Ansatz zur vollautomatischen Netzabbildung entwickelt.

Zu beachten ist, dass bei dem RMA-Verfahren neben der gefundenen Lösung oftmals weitere Lösungen ausgegeben werden. Da niemals alle realen Randbedingungen berücksichtigt werden können, kann der Netzplaner diese weiteren Lösungen ebenfalls in seine Auswahl miteinbeziehen.

## 5 Literatur

- [1] Kaufmann, W.: Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme, 1. Auflage, VWEW-Verlag, Frankfurt am Main, 1995.
- [2] Becker, A.; et al.: Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilnetzen – Regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen, 1. Auflage, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2014.
- [3] Rönnqvist, M.; Tragantalerngsak, S.; Holt, J.: A repeated matching heuristic for the single-source capacitated facility location problem, Schweden und Österreich, Januar 1997.
- [4] Klose, A.; Drexl, A.: Facility location models for distribution system design, Schweiz und Deutschland, Oktober 2001.
- [5] Horn, R. A.: The Hadamard Product. In: Charles R. Johnson (Hrsg.): Matrix Theory and Applications (AMS Short Course Lecture Notes. 40). American Mathematical Society, 1990
- [6] Walz, G.: Tschebyschew-Norm in Lexikon der Mathematik. 1 Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Mannheim/Heidelberg 2000
- [7] Weber, A.: Über den Standort der Industrien. 1.Teil: Reine Theorie des Standorts. 2. Auflage. Tübingen 1922
- [8] Sridharan, R.: A Lagrangian heuristic for the capacitated plant location problem with single source constraints, Indien, August 1989.
- [9] Bornstein, C.-T.; Azlan, H. B.: The use of reduction tests and simulated annealing for the capacitated plant location problem, Brasilien und Chile, September 1999.
- [10] Jaramillo, J. H.; Bhadury, J.; Batta, R.: On the use of genetic algorithm to solve location problems, USA, Dezember 2001.
- [11] Cortinhal, M. J.; Captivo, M. E.: Upper and lower bounds for the single source capacitated location problem, Portugal, Februar 2003.
- [12] Chen, C.-H.; Ting, C.-J.: Combining Lagrangian heuristic and Ant Colony System to solve the Single Source Capacitated Facility Location Problem, Taiwan, August 2007.
- [13] Klincewicz, J. G.; Luss, H.: *A Lagrangian Relaxation Heuristic for Capacitated Facility Location with Single-Source*, The Journal of the Operational Research Society, Vol. 37, No. 5 (May, 1986), pp. 495-500
- [14] Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: Numerische Mathematik. 1, 1959, S. 269–271
- [15] Oswald, B. R.: Berechnung von Drehstromnetzen, 1. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [16] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 60909: Kurzschlußströme in Drehstromnetzen – Berechnung der Ströme, Beuth Verlag, Berlin, 2013-02
- [17] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN VDE 0276: Starkstromkabel
- [18] u.a.: Amateur-Video: „Enercity Stromkasten Feuer in Hannover 18.9.14“ <http://www.youtube.com/watch?v=DzLxMGGfJDE>