

# Systembeschreibung

## RTR\_ACCNET

---

### *Methoden- und User-Referenzen*

Das System RTR\_ACCNET unterstützt die Simulation von Festnetz-Infrastrukturen im Zugangsbereich. Dabei kann einerseits eine existierende Infrastruktur (Cu-Netzwerk, Leerrohr-Infrastruktur, existierende Glasfaser-Infrastruktur) emuliert werden und andererseits ein NGA-Netzwerkausbau auf Basis der existierenden Infrastruktur simuliert werden. Das vorliegende Dokument beschreibt die dazu entwickelten Systemkomponenten, die dahinterliegenden Modelle, deren Input-Output-Daten sowie die entsprechenden Parametrierung. Dieses Dokument dient dem User als methodische Referenz.

*Im Auftrag von:*

*Österreichische Rundfunk und Telekom Regulierungsgesellschaft mbH  
Mariahilfer-Straße 77-79  
A-1060 Wien*

*FH-Prof. Dr. Peter Bachhiesl, Dipl.-Ing.(FH)Markus Prosegger  
13.6.2015, Version 1.3*

---

# Inhalt

1	Systemspezifikation und -komponenten.....	1
2	Input-/Output-Daten – Netzwerkgraphen .....	2
2.1	Knoten- Kanten Modelle .....	2
2.2	Konstruktion von Netzwerkgraphen – Geo-Basisdaten .....	5
3	Der Infrastruktur-Emulator .....	6
3.1	Der Cu-Generator .....	6
3.1.1	Spezifikation, Workflow, Modelle und Parameter .....	6
3.1.2	Pre-Processing .....	7
3.1.3	Cluster-Modell .....	12
3.1.4	Trassierungs-Modell .....	17
3.1.5	Hardware-Modell .....	19
3.2	Der Leerrohr-Generator .....	33
3.2.1	Spezifikation, Workflow und Steuerung.....	33
3.2.2	Das Modell <code>GrowFromHV</code> .....	34
3.2.3	Das Modell <code>TakeNrTwinWires</code> .....	36
3.3	Der Fiber-Generator .....	36
3.4	Betriebsmodi des Infrastruktur-Emulator .....	37
4	Der NGA-Solver.....	38
4.1	Spezifikation, Daten und Steuerung.....	38
4.1.1	Spezifikation Workflow, Input- und Output-Daten .....	38
4.1.2	Parameter.....	38
4.1.3	Workflow .....	39
4.2	Sub-Modelle .....	40
4.2.1	Das ARU-Positionierungsmodell.....	40
4.2.2	Das Trassierungs-und Hardwaremodell .....	43
5	Output-Daten – Reportfiles.....	45
5.1	Allgemeines zum Reporting.....	45
5.2	Cu-Generator-Report .....	45
5.2.1	Input-Daten, Netzwerkgraph.....	45
5.2.2	Pre-Processing .....	46
5.2.3	Cluster-Modell .....	46
5.2.4	Trassierungs-Modell .....	47
5.2.5	Hardware-Modell .....	50

5.3	Leerrohr-Generator .....	51
5.4	Fiber-Generator .....	53
5.5	NGA-Solver .....	53
5.5.1	Gesamtergebnis.....	53
5.5.2	Trassierungsmodell .....	54
5.5.3	Hardware-Modell, ARU-Positionierungen.....	55
6	Literaturverzeichnis.....	59
7	Index .....	60
8	Abkürzungsverzeichnis .....	62

# 1 Systemspezifikation und -komponenten

Das System RTR\_ACCNET erlaubt die Simulation eines Kosten-optimierten Festnetzausbaus in einem Wählamtsbereich (Versorgungsbereich bzw. Zugangsnetzbereich eines bestehenden Wählamts oder Hauptverteilers). Wählamtsbereiche werden des weiteren auch als Anschlussbereiche (ASB) bezeichnet. Die räumliche Topologie eines Anschlussbereichs (Landnutzungen, Kabelauslässe, Position des Hauptverteilers usw.) wird dem System in Form von Input-Daten bereitgestellt (siehe dazu Abschnitt 2).

Diese Simulation erfolgt in zwei sequentiellen Schritten:

1. Simulation einer bestehenden Netzwerk-Infrastruktur. Mit Hilfe eines Infrastruktur-Emulators (siehe Abschnitt 3) werden die folgenden Infrastrukturen errechnet: Cu-Netzwerk, nutzbare Leer-Verrohrungen sowie nutzbare Glasfaser-Infrastruktur (dark fiber).
2. Simulation des Festnetzausbaus. Mit Hilfe eines NGA-Solver wird ein Kosten-optimiertes Hybridnetz für die Versorgung unterschiedlicher Objekte ausgehend vom Hauptverteiler-Standort errechnet. Der Netzwerkausbau erfolgt dabei unter Berücksichtigung der im ersten Schritt errechneten Infrastruktur (siehe Abschnitt 4).

Das System RTR\_ACCNET besteht aus den folgenden Sub-Systemen bzw. Daten- und Parametergruppen:

- Input-/Output-Daten. Zu dieser Gruppe gehören:
  - Netzwerkgraph (beschreibt die räumliche Topologie sowie die existierende, nutzbare oder neu berechnete Netzwerkinfrastruktur eines Anschlussbereichs)
  - Lösungsfile (Simulationsergebnisse von Modellen)
  - Reportfile (Simulationsergebnisse in Form von Excel-Tabellen)
- Modelle zur Simulation der bestehenden Netzwerkinfrastruktur (Infrastruktur-Emulator)
- NGA-Solver zur Simulation einer kosten-optimierten Festnetzerweiterung
- Modell-Parameter. Zu dieser Gruppe gehören:
  - Strategische- oder Kontroll-Parameter (steuern einerseits methodische Ansätze als auch allgemeine Parameter von Modellen)
  - Kosten-Parameter (Kostenfaktoren, die mit den Entscheidungsvariablen der Modelle gekoppelt sind)
  - Hardware-Parameter (Typendefinitionen von Komponenten, die mit den Entscheidungsvariablen der Modelle gekoppelt sind)

Der prinzipielle Workflow des Systems RTR\_ACCNET ist in Abbildung 1 dargestellt.

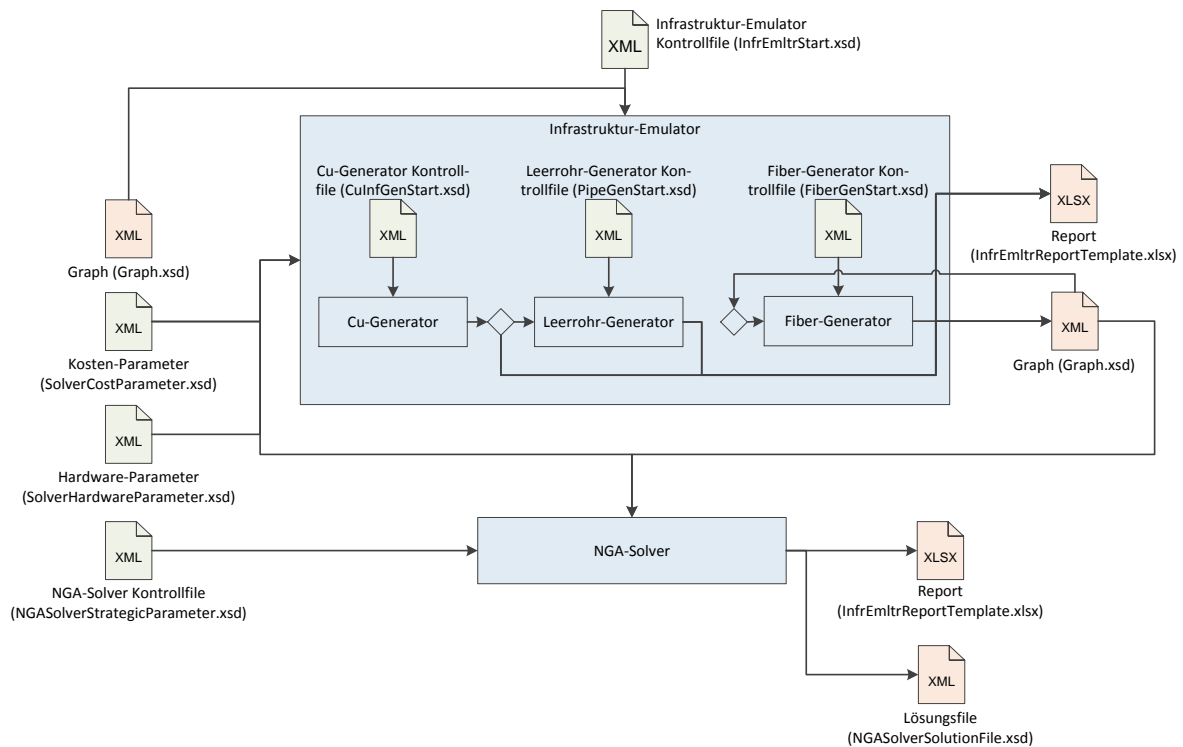


Abbildung 1. Zusammenwirken der Komponenten des Systems RTR\_ACCNET. Blau, rot und grün hinterlegte Symbole stellen Modelle, Input-/Output-Daten und Modell-Parameter dar.

## 2 Input-/Output-Daten – Netzwerkgraphen

### 2.1 Knoten- Kanten Modelle

Netzwerkgraphen sind Knoten-Kanten-Modelle, wobei einer Kante immer zwei inzidente Knoten zugewiesen werden. Die Kante stellt damit eine Beziehung zwischen den beiden inzidenten Knoten dar. Im System RTR\_ACCNET entsprechen Knoten immer geographischen Positionen (sind geometrisch verortet) und Kanten immer einer räumlichen Verbindung zwischen den beiden Knoten. Die Bedeutung der Knoten und der verbindenden Kanten werden durch entsprechende Knoten- und Kantenattribute erweitert. Ein detaillierter Überblick zu Netzwerkgraphen und ihrer Behandlung wird beispielsweise in (Bachhiesl, Modeling of Passive Optical- and Hybrid Network Infrastructure within the City-Net Domain, 2008), (Jungnickel, 1999) oder in (Koster & Munoz, 2010) gegeben. Derartige Graphen stellen geeignete Datenstrukturen dar, um die räumliche Topologie sowie die Netzwerkinfrastruktur eines Wähleramtsbereichs abzubilden. Siehe Abbildung 2 und Abbildung 3 für ein entsprechendes Beispiel.

Wir stellen nachfolgend die wichtigsten Attribute von Netzwerkgraphen, bzw. deren Knoten und Kanten dar, soweit dies für das Verständnis der nachfolgenden Sektionen notwendig erscheint.

Attribut	Bedeutung
HashvalueASB	Hash-Wert (eindeutig für jeden ASB)
v	Bezeichner für Knoten (eindeutig für jeden Knoten)
x (v)	x-Position des Knoten (Rechtswert in Meter bezogen auf einen geographischen Referenzpunkt)

$y(v)$	y-Position des Knoten (Rechtswert in Meter bezogen auf einen geographischen Referenzpunkt)
$I(v)$	Netzwerk-Infrastruktur, die dem Knoten zugeordnet wird (z.B. Kabelauslässe, Gehäuse, Outdoor-DSLAM etc.
$e$	Bezeichner für Kante (eindeutig für jede Kante)
$\gamma(e)$	Bezeichner der beiden zur Kante inzidenten Knoten
$l(e)$	Euklidische Länge der Kante; entspricht der räumlichen Distanz zwischen den beiden inzidenten Knoten (in Meter)
$\Omega(e)$	Landnutzungsklassen, die der Kanten zugeordnet werden; pro Klasse wird unterschieden ob ein Wegerecht auf der Kante besteht oder nicht.
$I(e)$	Netzwerk-Infrastruktur, die der Kante zugeordnet wird; unterstützt wird: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cu-Kabel (Kabel-Bezeichner, Cu-Querschnitt pro Ader im Millimeter, Anzahl der Adern im Kabel)</li> <li>• Glasfaser-Kabel (Kabel-Bezeichner, Anzahl aller Fasern im Kabel, Anzahl der ungenutzten Fasern im Kabel)</li> <li>• Leerrohr (Restrohr-Kapazität in Millimeter – siehe Abschnitt 3.3.2)</li> </ul>
$v_{HV}$	Bezeichner des Knoten, dem der Hauptverteiler zugeordnet wird
$a$	Bezeichner des Anschlussobjekts (eindeutig für jedes Objekt)
$v(a)$	Bezeichner des Knoten, dem das Objekt zugeordnet wird
$t(a)$	Typ des Objekts; unterstützt werden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kabelauslass (siehe Abschnitt 3.3.1)</li> <li>• B2B-Kunde (siehe Abschnitt 4)</li> <li>• BTS-Standort (siehe Abschnitt 4)</li> </ul>
$\pi(a)$	Potentielle Einheiten (PE) für Kabelauslass (siehe Abschnitt 3.3.1) oder Anzahl an Versorgungsfasern für B2B-Kunde oder BTS-Standort (siehe Abschnitt 4)

Tabelle 1. Auflistung der wichtigsten Attribute von Netzwerkgraphen.

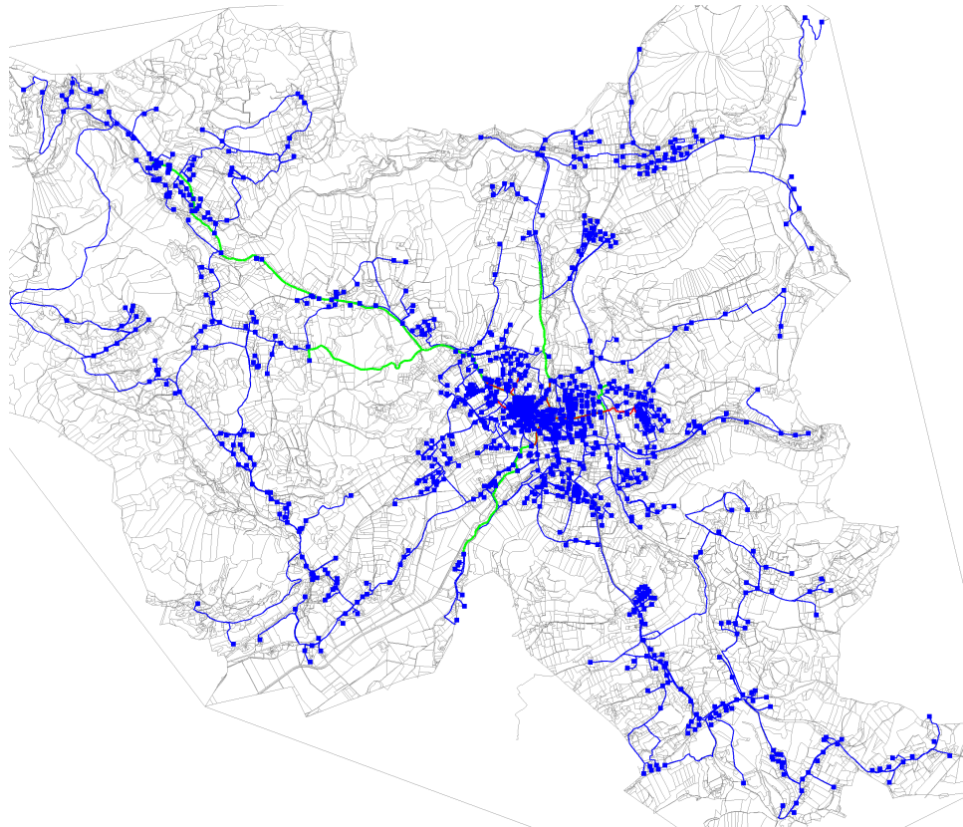


Abbildung 2. Netzwerkgraph für den Wählerbereich 04276-02 (Feldkirchen/Kärnten) mit emulierter Cu-Netzwerk (blau) zur Versorgung von gegebenen Kabelauslässen (blaue Quadrate), emulierter Leerrohr-Infrastruktur (grün) und emulierter Glasfaserinfrastruktur (rot). Die Ausdehnung des Wählerbereichs in y-Koordinatenrichtung beträgt ca. 11 km. Der Graph besitzt ca. 260.000 Knoten und 580.000 Kanten.

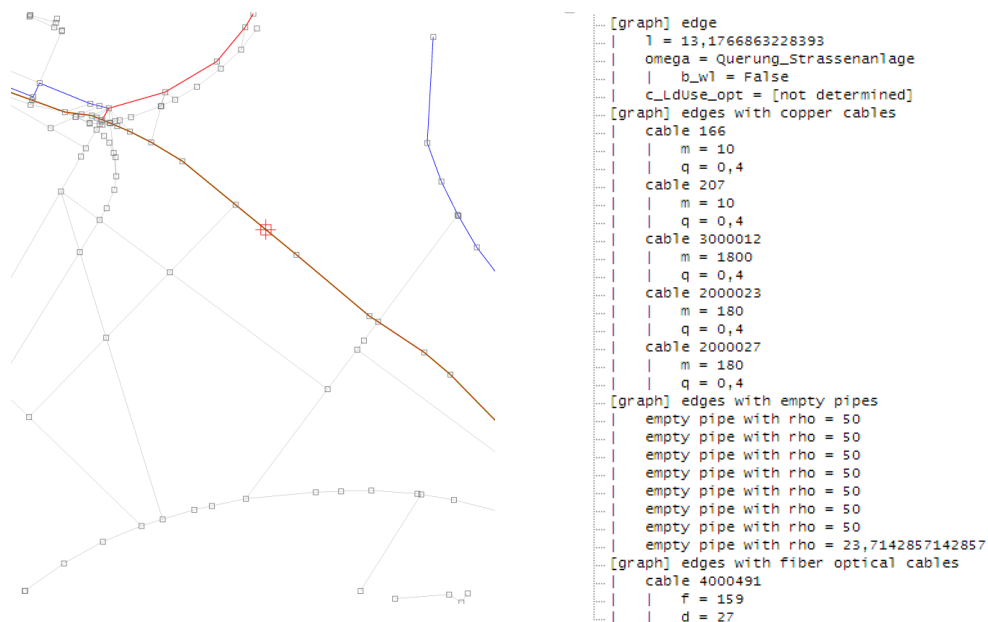


Abbildung 3. Gezoomter Bereich aus Abbildung 2 (Kreuzungsbereich mit einer Straßenanlage). Die Knoten sind mit grauen Quadraten gekennzeichnet. Exemplarisch werden die Attribute einer Kante (durch rotes Kreuz gekennzeichnet) angegeben: die Kante hat eine Länge von ca. 13 m, der Kante wurde die Landnutzung „Querung\_Strassenanlage“ zugeordnet, entlang der Kante laufen 5 Cu-Kabel (m... Anzahl der Doppeladern, q... Cu-Querschnitt in mm) sowie 8 Rohre wovon 7 einen Restrohr-Durchmesser von 50 mm und eines von ca. 23 mm. Zudem führen entlang der Kante 159 Glasfasern, wovon 27 nicht beschalten sind.

## 2.2 Konstruktion von Netzwerkgraphen – Geo-Basisdaten

Die Netzwerkgraphen werden auf Basis der Digitalen Katastralmappe (DKM) erzeugt. Die darin enthaltenen Polygone stellen die Grenzen von Landnutzungen dar und werden nach Bereinigung von möglichen Datenfehlern (z.B. offene oder sich selbst schneidende Polygone) als Ausgangsbasis für die Konstruktion der Netzwerkgraphen verwendet.

Für alle als Gebäude klassifizierten Polygone (mit einer Fläche von mind. 60m<sup>2</sup>) wird das geometrische Zentrum bestimmt und als potentielles Anschlussobjekt (Kabelausslässe) in den Graphen übernommen. Liegt das geometrische Zentrum außerhalb des Polygons, so wird dieser auf den nächstgelegenen (Euklidische Distanz) bestehenden Knoten des Polygons verschoben. Die so erzeugten Anschlussobjekte werden mit Hilfe von orthogonalen Projektionen an den Netzwerkgraphen angebunden.

Zur Verbesserung der Qualität des erzeugten Netzwerkgraphs sowie zur Sicherstellung der Konnektivität werden zusätzliche Querungen von Polygonen (z.B. von Straßen oder fließenden Gewässern) eingeführt.

Zur Bestimmung der potentiellen Einheiten (i.e. Demand) eines Anschlussobjekts werden die Attribute der Mikrozellendaten genutzt (siehe Abbildung 4). Das verfügbare Potential innerhalb des 100m x 100m Rasters wird aus der Summe der enthaltenen Gebäude (ohne Wohngebäude) und Wohnungen gebildet und wird anteilmäßig auf die im Raster enthaltenen Anschlussobjekte verteilt. Ein Anschlussobjekt außerhalb des Rasters wird mit einem Defaultwert von 1 belegt.

Für eine detaillierte Beschreibung der Graphenkonstruktion verweisen wir auf (Prosegger, 2014).

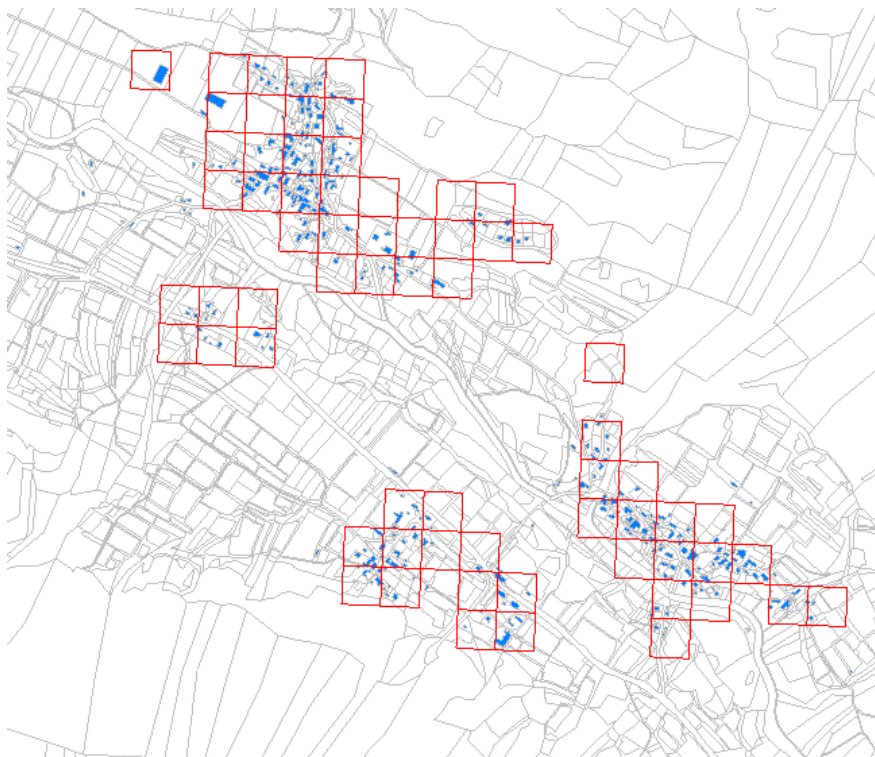


Abbildung 4. Konstruierter Netzwerkgraph mit den generierten Anschlussobjekten (blau) und den Mikrozellendaten als Overlay (rot).



## 3 Der Infrastruktur-Emulator

### 3.1 Der Cu-Generator

#### 3.1.1 Spezifikation, Workflow, Modelle und Parameter

Wir gehen von einem Netzwerkgraphen gemäß Abschnitt 2 aus. Es sind weder Knoten noch Kanten existierende Netzwerk-Infrastruktur zugeordnet. Die Anschlussobjekte sind vorgegebene Kabelauslässe (KA) mit entsprechenden potentiellen Einheiten (PE); die PE entsprechen der Anzahl der Teilnehmeranschlusseinrichtungen (TAE), die über den jeweiligen Kabelauslass versorgt werden (siehe Abschnitt 2.2.2). Auf Basis dieser Daten errechnet der Cu-Generator eine kosten-optimierte physikalische Struktur eines Cu-Netzwerkes (POTS-ISDN-Netzwerk) zur Versorgung aller KA ausgehend vom Hauptverteiler-Standort (HV). Danach wird der Netzwerkgraph um die emulierte Cu-Infrastruktur erweitert bzw. ein entsprechender Report erstellt (siehe Abschnitt 5).

Der Cu-Generator wird über drei Parameterdatensätze gesteuert – wir beschreiben nachfolgend für jeden dieser Datensätze die für das methodische Verständnis notwendigen Parameter:

- Cu-Generator Kontrollfile (steuert die Sub-Modelle des Generators).

<i>Parametersatz</i>	<i>Bedeutung</i>
PreProcessing	Steuert die Pre-Processing Submodelle des Generators; siehe Abschnitt 3.3.1 und 3.1.2.
NetworkDomains	Steuert das Cluster-Modell des Generators; siehe Abschnitt 3.3.1 und 3.1.3.
Solver	Steuert das Trassierungs- und das Hardware-Modell des Generators; siehe Abschnitt 3.3.1 und 3.1.4 sowie 3.3.1 und 3.1.5.

*Tabelle 2. Einträge im Cu-Generator Kontrollfile.*

- Kosten-Parameterfile (bestimmt die Errichtungskosten von Cu-Infrastruktur bezogen auf räumliche Gegebenheiten).

<i>X-Path Verweis</i>	<i>Bedeutung</i>
Landuse	Verlegekosten (Tiefbaukosten) in EUR, die bei der Errichtung neuer Infrastruktur pro Landnutzungs-kategorie und Laufmeter anfallen
TrenchOffset	Penalty-Kosten in EUR, die bei der Überschreitung der Standard-Künettenbreite pro Meter anfallen

*Tabelle 3. Einträge im Cu-Generator Kosten-Parameterfile.*

- Hardware-Parameterfile (bestimmt physikalische Struktur und Stückkosten von Cu-Netzwerkelementen).

<i>X-Path Verweis</i>	<i>Bedeutung</i>
CuCable	Typen von Cu-Kabeln; pro Typ sind die folgenden Attribute gegeben: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezeichner des Typs</li> <li>• Anzahl der enthaltenen Adernpaare</li> <li>• Cu-Querschnitt einer Ader in Millimeter</li> <li>• Benötigte Künettenbreite in Meter</li> <li>• Maximale durchgängige Verlegelänge in Meter</li> </ul>

CuNdCmp	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten pro Stück (Solver- und Reportkosten) in EUR</li> </ul> Typen von Cu-Hardwarekomponenten; pro Typ sind die folgenden Attribute gegeben: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezeichner des Typs</li> <li>• Anzahl der Cu-Input- und Cu-Outputports</li> <li>• Bauart des Typs; unterstützt werden die folgenden Bauarten: Kabelauslass (KA), Kabelverteiler (KV), Abzweigmuffe (AM) und Verbindungsmuffe (VM)</li> <li>• Maximale Anzahl an Komponenten pro Knoten</li> <li>• Maximale Anzahl an (Upstream-seitigen) Versorgungskabeln pro Komponente; <b>ACHTUNG: bei Kabelauslässen sollte dieser Parameter gleich Eins gewählt werden (der NGA-Solver geht von einer eindeutigen Kabel-Versorgung eines Kabelauslasses aus)!</b></li> <li>• Kosten pro Stück (Solver- und Reportkosten) in EUR</li> </ul>
MaxTrenchWidth	Maximale Künettenbreite in Meter
DefTrenchWidth	Standard-Künettenbreite in Meter
MaxCbl	Maximale Anzahl an (Upstream-seitigen) Versorgungskabel pro Knoten
MaxComp	Maximale Anzahl an Cu-Komponenten pro Knoten

Tabella 4. Einträge im Cu-Generator Hardware-Parameterfile.

Die Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Workflow des Cu-Generators.

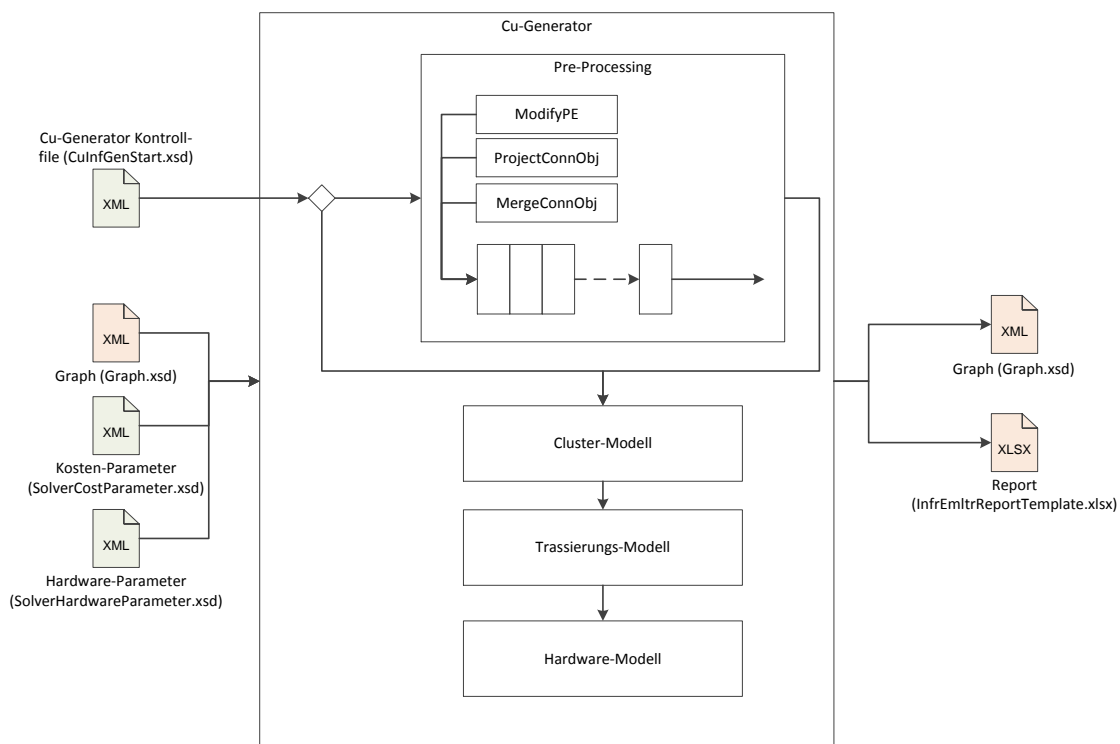


Abbildung 5. Workflow und Modelle des Cu-Generators.

### 3.1.2 Preprocessing

Es werden drei Preprocessing-Modelle bereitgestellt, in beliebiger Reihenfolge sukzessive angewendet werden können; sukzessive bedeutet, dass jedes Modell auf Basis des Ergebnisses des davor-geschalteten Modells arbeitet. Der User entscheidet im Kontrollfile ob und wie die entsprechende Modell-Queue aufgebaut wird. Wir beschreiben nachfolgend die drei Modelle.

### 3.1.2.1 Das Modell `ModifyPE`.

Das Modell modifiziert die potentiellen Einheiten der Kabelauslässe einer Graph-Instanz. Wir bezeichnen mit  $A$  die Menge der Kabelauslässe im Graphen; mit  $\pi(a)$  seien die potentiellen Einheiten eines Kabelauslasses  $a \in A$  gegeben. Es gilt die potentiellen Einheiten derart zu modifizieren, so dass die Zielsumme  $\pi^* = \left\lceil \frac{r}{100} \sum_{a \in A} \pi(a) \right\rceil$  erreicht wird.  $r$  ist dabei ein Modell-Parameter, der im Cu-Generator Kontrollfile bestimmt wird.

Die Manipulation erfolgt optional mit zwei Methoden, die über das Cu-Generator Kontrollfile angesteuert werden können. Beide Methoden sortieren zunächst die Kabelauslässe absteigend nach potentiellen Einheiten.

- Die Methode `MaintainObjects` durchläuft die Kabelauslässe und reduziert die potentiellen Einheiten jeweils um Eins, sofern dadurch nicht alle potentiellen Einheiten eines Auslasses verschwinden. Diese Prozedur wird solange wiederholt, bis die Zielgröße erreicht wird. Damit folgt aber, dass die Zielgröße nicht kleiner als die Anzahl der gegebenen Kabelauslässe sein darf. Diese Methode „erhält“ alle Kabelauslässe und führt tendenziell zu einem Ausgleich der potentiellen Einheiten.
- Die Methode `Equalized` durchläuft alle Kabelauslässe und reduziert die potentiellen Einheiten in jedem Fall um Eins. Ergibt sich dabei der Wert Null, so wird der Kabelauslass aus dem Graphen entfernt. Diese Prozedur wird solange wiederholt, bis die Zielgröße erreicht wird. Bei dieser Methode gehen im Allgemeinen Kabelauslässe verloren, es wird jedoch das Größen-Verhältnis der potentiellen Einheiten zwischen den restlichen Kabelauslässen erhalten.

Siehe Abbildung 6 bis Abbildung 8 für einen exemplarischen Vergleich der beiden Reduktionsmethoden.

Bemerkung: Der Parameter  $r$  ist dabei nicht auf 100 beschränkt – Werte über 100 führen zu einer erhöhten Zielgröße und damit die potentiellen gemäß der oben genannten Methoden jeweils um Eins erhöht.

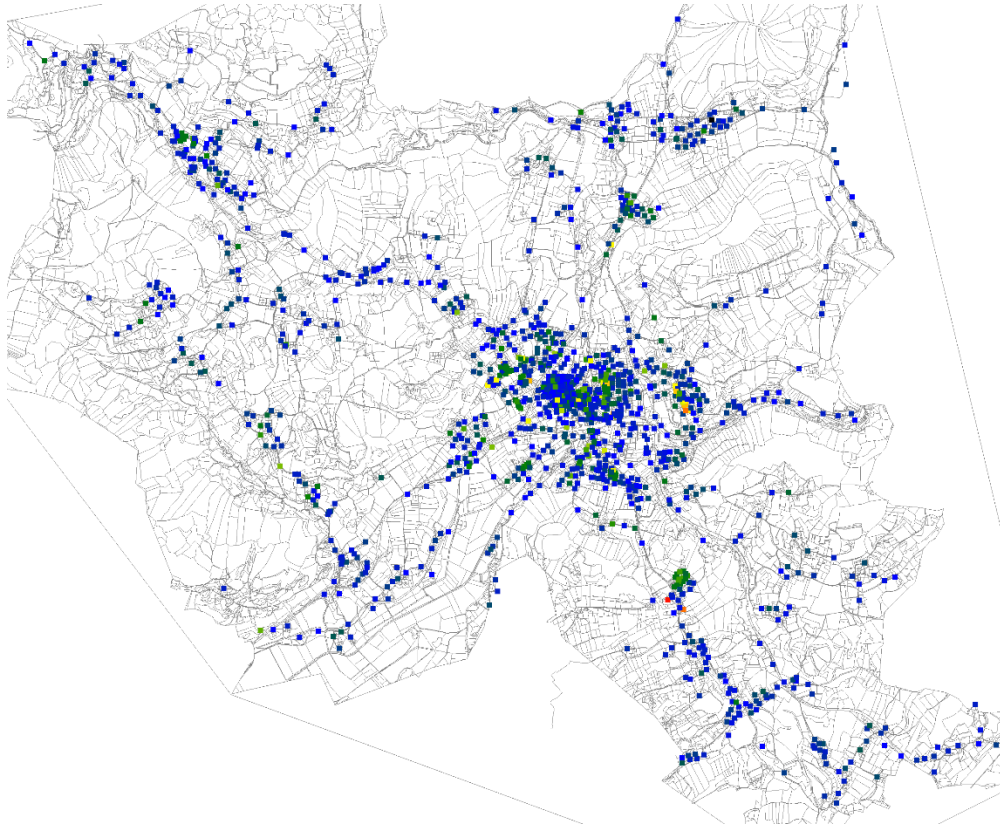


Abbildung 6. 1331 Kabelausslässe des Netzwerkgraphen 04276-02 (Feldkirchen/Kärnten) mit einer Gesamtsumme von 6322 potentiellen Einheiten. Je nach Anzahl der potentiellen Einheiten sind die Kabelausslässe von blau (eine PE) bis rot (36 PE und mehr) eingefärbt.

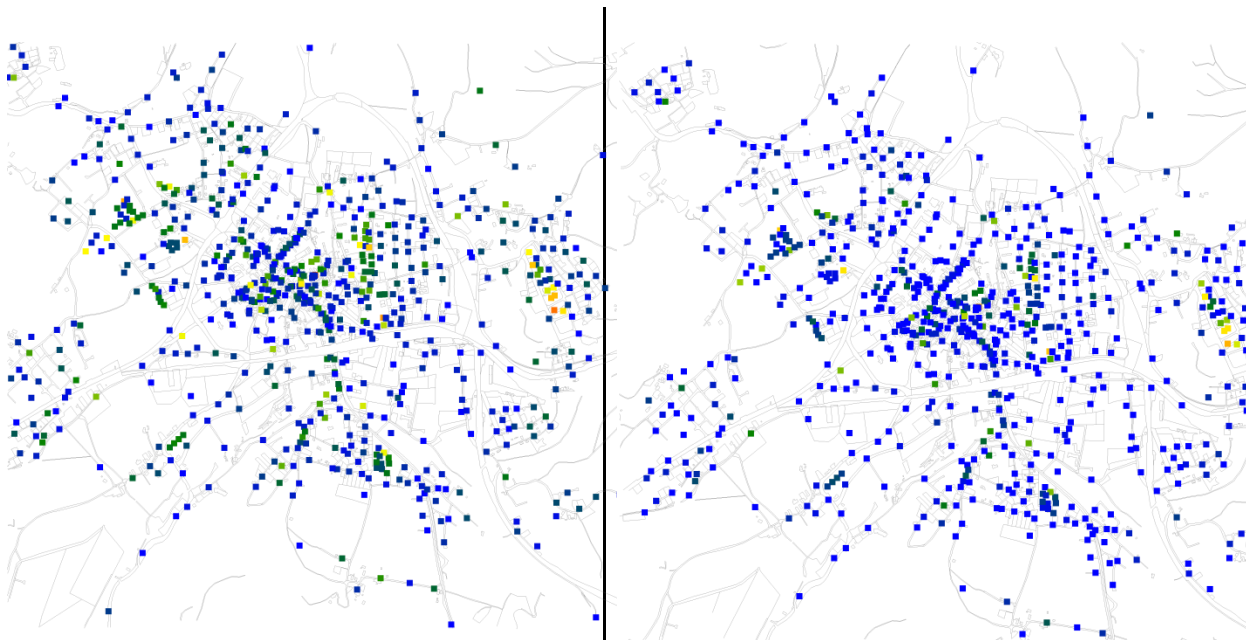


Abbildung 7. Manipulierte potentielle Einheiten des Netzwerkgraphen 04276-02 (Feldkirchen/Kärnten). Das linke Bild zeigt die Ausgangssituation für einen gezoomten Bereich der Abbildung 6. Die Zielsumme beträgt 3161 (50%) und die Manipulationsmethode ist *MaintainObjects*. Das rechte Bild zeigt das entsprechende Ergebnis: alle Kabelausslässe bleiben erhalten, die Ihnen zugeordneten potentiellen Einheiten werden verringert.

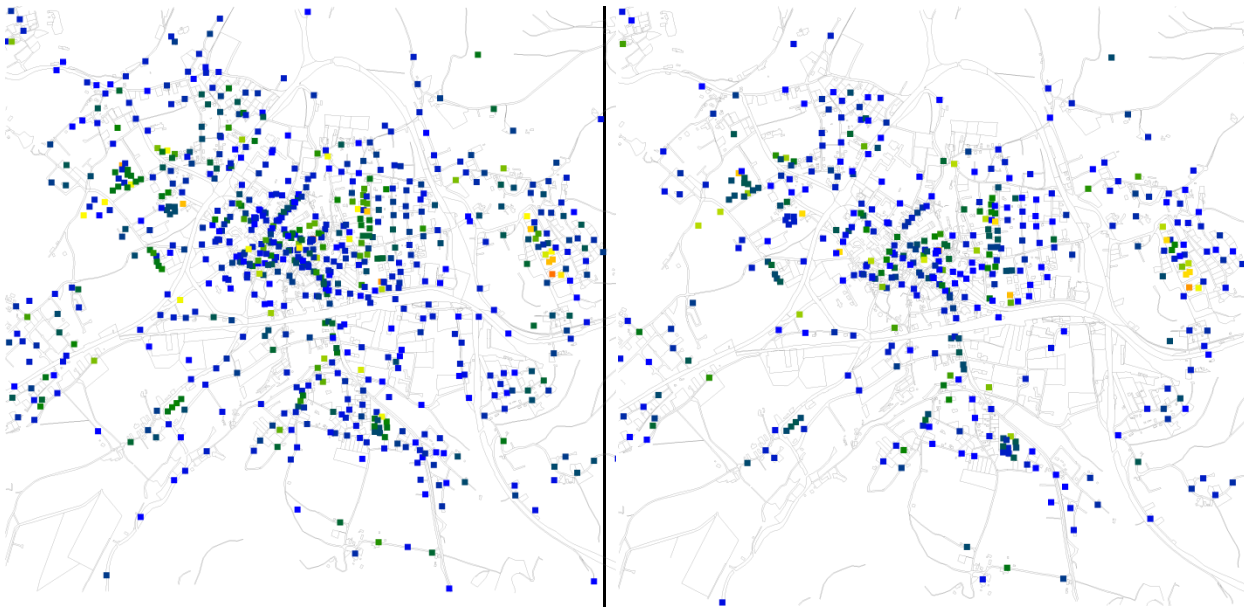
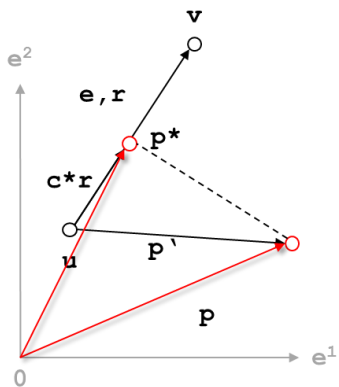


Abbildung 8. Manipulierte potentielle Einheiten des Netzwerkgraphen 04276-02 (Feldkirchen/Kärnten). Das linke Bild zeigt die Ausgangssituation für einen gezoomten Bereich der Abbildung 6. Die Zielsumme beträgt 3161 (50%) und die Manipulationsmethode ist *Equalized*. Das rechte Bild zeigt das entsprechende Ergebnis: die potentiellen Einheiten der Kabelauslässe werden verringert und es werden dabei Kabelauslässe gelöscht.

### 3.1.2.2 Das Modell ProjectConnObj.

Dieses Modell unterstützt die orthogonale Projektion von Kabelauslässen auf Kanten, denen vom User ausgewählte Landnutzungsklassen zugeordnet sind. Wir verstehen dabei die räumliche Position eines Knotens, dem ein Kabelauslass zugewiesen wird, als Ortsvektor  $p$ ; ebenso sind die Positionen der beiden inzidenten Knoten einer Kante  $e$ , die über zumindest eine der ausgewählten Nutzungsklassen verfügt, als Ortsvektoren  $u$  und  $v$  zu verstehen. Die orthogonale Projektion konstruiert nunmehr einen neuen Kandidaten-Knoten mit Position



$$p^*(e) = u + \frac{\langle p'|r \rangle}{\langle r|r \rangle} r \text{ wobei } p' = p - u.$$

Die nebenstehende Abbildung veranschaulicht dies symbolisch. Unter allen berechneten Kandidaten-Knoten (bzgl. aller entsprechenden Kanten) weisen wir den Kabelauslass jenem zu, der die geringste Euklidische Distanz besitzt; siehe auch (Klein, 2005). Die Abbildung 9 zeigt ein exemplarisches Beispiel.

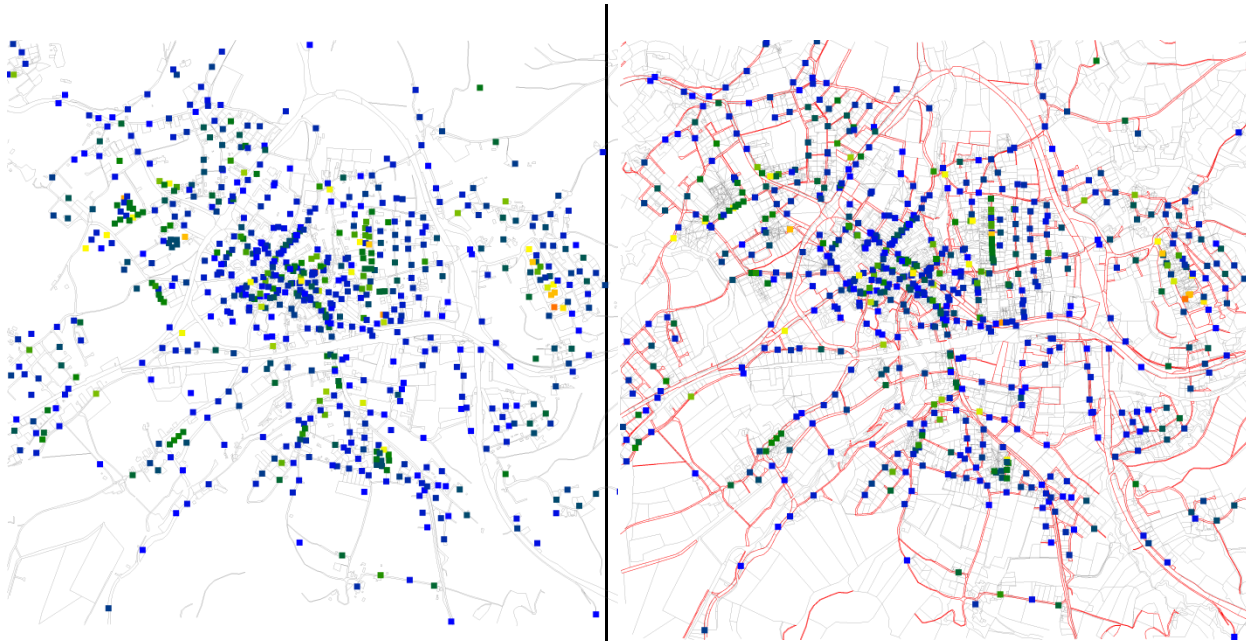


Abbildung 9. Das linke Bild zeigt die Ausgangssituation für einen zoomten Bereich der Abbildung 6. Die Kabelauslässe wurden auf die Landnutzungsklasse „Strassenanlage“ projiziert. Das rechte Bild zeigt das entsprechende Ergebnis; die Kanten mit dieser Nutzung sind rot dargestellt.

### 3.1.2.3 Das Modell MergeConnObj

Dieses Modell erlaubt die „Zusammenführung“ von Kabelauslässen, die „hinreichend räumlich benachbart“ sind. Dazu betrachten wir zunächst alle Terminal-Knoten; dies sind Knoten des Netzwerkgraphen, denen zumindest ein Kabelauslass zugewiesen wurde. Auf Basis des Modells TerminalCluster (siehe Abschnitt 3.1.3.4) werden diese Knoten zu räumlichen Clustern zusammengefaßt. Jedes Cluster-Zentrum entspricht einem repräsentativen Terminal-Knoten, auf dem alle Kabelauslässe aller Terminal-Knoten des Clusters in einem neuen Kabelauslass zusammengefaßt werden. Die den Kabelauslässen zugeordneten potentiellen Einheiten bleiben davon unberührt.

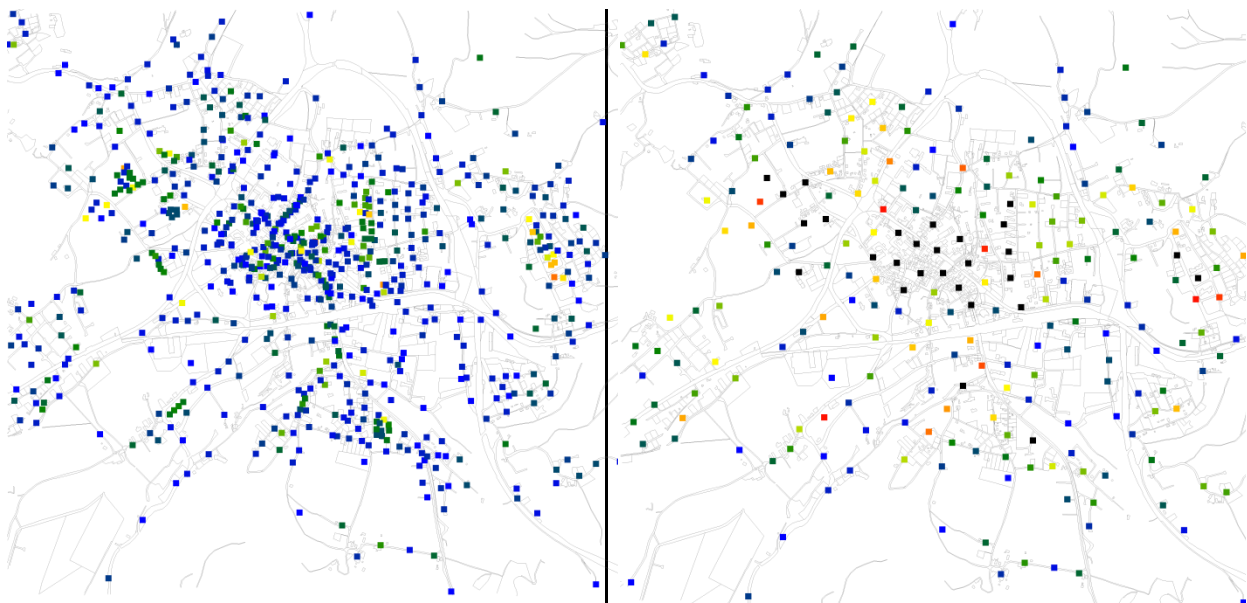


Abbildung 10. Das linke Bild zeigt die Ausgangssituation für einen gezoomten Bereich der Abbildung 6. Die ursprünglich 1331 Kabelauslässe wurden auf 591 reduziert; die Gesamtsumme der potentiellen Einheiten bleibt unverändert. Das Modell wurde mit Euklidischen Punkt-zu-Punkt Distanz betrieben; Terminalknoten mit einer Distanz bis zu 100 Metern werden als hinreichend räumlich benachbart betrachtet; die Obergrenze an potentiellen Einheiten pro Cluster beträgt 200.

### 3.1.3 Cluster-Modell

#### 3.1.3.1 Cu-Netzwerkhierarchien

Wir definieren drei Hierarchien für das Cu-Netzwerk eines Anschlussbereichs im bottom-up Modus (in Upstream-Richtung):

- Das End-Verteilkabelnetz (EVNt) stellt die Versorgungsstrecken der Kabelauslässe bis zu den jeweils ersten Kabelverteilknoten (Kabelverteiler) dar.
- Das Zwischen-Verteilkabelnetz (ZVNt) stellt die Versorgungsstrecken der ersten Kabelverteilknoten bis zu den jeweils letzten Kabelverteilknoten (Kabelverteiler) dar.
- Das Amtskabelnetz (AKNt) stellt die Versorgungsstrecken der letzten Kabelverteilknoten bis zum Hauptverteiler dar.
- Der Hauptverteilerkreis (HV-Kreis) stellt die Versorgungsstrecken jener Kabelauslässe dar, die direkt (ohne Rangierung auf der Versorgungsstrecke) an den Hauptverteiler angeschlossen werden.

In den einzelnen Netzwerkhierarchien können Versorgungskabel an Abzweigpunkten (Abzweigmuffen) in Downstream-Richtung verteilt werden. Die Abbildung 11 zeigt diese Hierarchisierung schematisch.

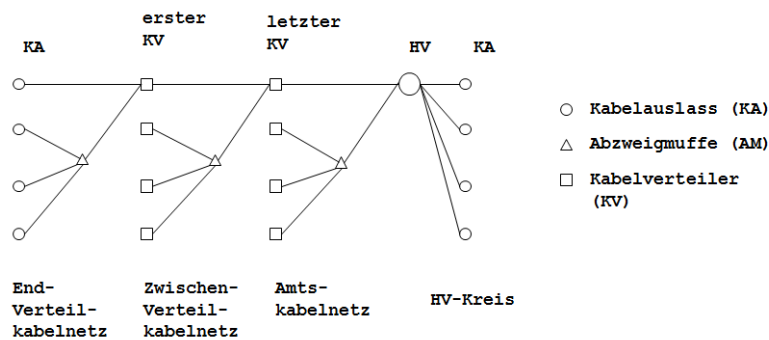


Abbildung 11. Schematische Darstellung der Hierarchien in einem Cu-Netzwerk.

#### 3.1.3.2 Generierung der Netzwerkhierarchien – das Cluster-Modell

Die Generierung der Netzwerk-Hierarchien erfolgt im bottom-up Modus:

1. Wir betrachten zunächst alle Knoten des Graphen, denen Kabelauslässe zugewiesen sind – wir bezeichnen diese als Terminalknoten; vergleiche Abschnitt 3.1.3.4. Der Bedarf eines Terminalknoten ist gleich der Summe der potentiellen Einheiten über alle Kabelauslässe, die dem Knoten zugewiesen wurden. Alle Terminalknoten, die eine Maximaldistanz zum Hauptverteiler-Standort nicht überschreiten werden der Hierarchie HV-Kreis zugeordnet. Es werden in Analogie zu Abschnitt 3.1.3.4 die beiden Distanz-Definitionen Euklidische Punkt-zu-Punkt Distanz und Shortest-Path-Distanz unterstützt. Die verbleibenden Terminalknoten werden mit Hilfe des Modells `TerminalCluster` (siehe Abschnitt 3.1.3.4) in Clustern angeordnet –

die entsprechenden Modellparameter sind im Cu-Kontrollfile definiert. Jeder Cluster entspricht dabei einem End-Verteilkabelnetz und das Cluster-Zentrum dem entsprechenden Kabelverteilpunkt zur Versorgung des Clusters.

2. Wir betrachten alle Cluster-Zentren des ersten Schritts und bezeichnen diese nunmehr als Terminalknoten. Diese werden wiederum mit Hilfe des Modells `TerminalCluster` zu Clustern gruppiert, die nunmehr den Zwischen-Verteilkabelnetzen entsprechen; jedes Cluster-Zentrum ist dabei wiederum ein Kabelverteilpunkt zur Versorgung des Clusters bzw. der darunterliegenden End-Verteilkabelnetze (letzter Kabelverteilpunkt). Das Distanz-Maß entspricht dabei dem des Schrittes Eins, die Modellparameter für das Modell `TerminalCluster` werden aus dem Cu-Kontrollfile übernommen.
3. Die Cluster Zentren des zweiten Schrittes bilden gemeinsam mit dem Hauptverteiler-Standort das Amtskabelnetz.

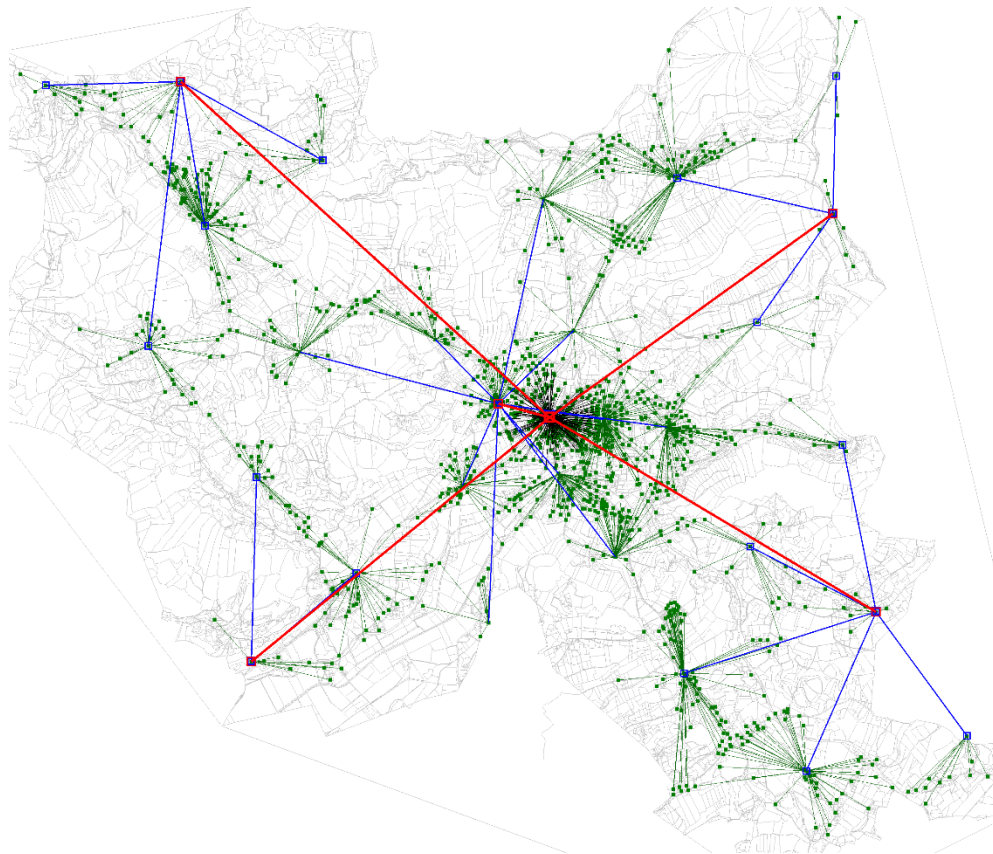


Abbildung 12. Ergebnis des Cluster-Modells für den Netzwerkgraphen 04276-02 (Feldkirchen/Kärnten); siehe Abbildung 6. Die jeweiligen Cluster-Zuordnungen werden durch die vom jeweiligen Cluster-Zentrum ausgehenden Strahlen dargestellt. Es wurden Euklidische Punkt-zu-Punkt Distanzen verwendet. Die Maximaldistanz für den HV-Kreis (schwarz) beträgt 600 Meter. Die Maximaldistanz und die maximale Summe an potentiellen Einheiten für den End-Verteilkabelnetzbereich (grün) und den Zwischen-Verteilkabelnetzbereich (blau) sind mit 1.500 Meter und 500 PE bzw. mit 4.000 Meter und unbeschränkter Anzahl an PE gegeben. Das entsprechende Amtskabelnetz ist in Rot dargestellt.

### 3.1.3.3 Versorgungslängen-Optimierung

Das in Abschnitt 3.1.3.4 beschriebene Cluster-Modell führt in der Regel zu räumlichen Rückversorgungen und damit zu erhöhten Gesamt-Versorgungslängen von Kabelauslässen



ausgehend vom Hauptverteiler-Standort. Zur Reduktion der Gesamtversorgungslänge wird das Ergebnis des Cluster-Modelles in einem top-down Prozeß nachbearbeitet.

Dazu betrachten wir das folgende Grundmodell:  $S$  und  $B$  seien zwei Cluster;  $T^S$  und  $T^B$  sind die entsprechenden Mengen der Terminalknoten. Weiters bezeichnen wir mit  $t^S \in T^S$  und  $t^B \in T^B$  die Cluster-Zentren. Wir setzen zu dem voraus, dass  $S$  super-adjazent zu  $B$  ist; d.h. entweder ist  $S$  und  $B$  ein End-Verteilkabel- und ein Zwischenverteilkabelnetz oder ein Zwischen-Verteilkabel- und das Amtskabelnetz und es gibt einen Terminalknoten  $s \in T^S$ , derart dass  $s = t^B$  gilt. Dann gehen wir wie folgt vor:

1. Bestimme jenen Terminalknoten  $b^*$  in  $B$  der die geringste Distanz zum Versorgungszentrum  $t^S$  von  $S$  hat. Das Distanz-Maß ist dabei durch das Cluster-Modell bestimmt.
2. Korrigiere den Terminalknoten in  $S$ , der dem Knoten  $t^B \in T^B$  entspricht, auf  $b^*$ .
3. Korrigiere das Versorgungszentrum  $t^B \in T^B$  auf  $b^*$ .

Wir fassen diese Prozedur unter der Bezeichnung  $ClstrPrResetCenter(S, B)$  zusammen. Auf Basis dieses Grundmodells formulieren wir nunmehr die folgende top-down Vorgehensweise:

1. Es sei  $A$  das Amtskabelnetz.
2. Für alle Cluster  $V$  der Zwischen-Verteilnetzebene führe die Prozedur  $ClstrPrResetCenter(A, V)$  durch.
3. Für alle Cluster  $E$  der Zwischen-Verteilnetzebene führe aus:
  - a. Bestimme den entsprechend super-adjazenten Cluster  $V$  der Zwischen-Verteilnetzebene.
  - b. Führe die Prozedur  $ClstrPrResetCenter(V, E)$  durch.

Die Durchführung dieser Versorgungslängen-Optimierung ist optional und wird über einen Parameter im Cu-Kontrollfile gesteuert. Man beachte in diesem Zusammenhang, dass durch dieses Post-Processing die Forderung der maximalen Distanz von Terminalknoten eines Clusters zum entsprechenden Cluster-Zentrum im Allgemeinen verletzt wird.

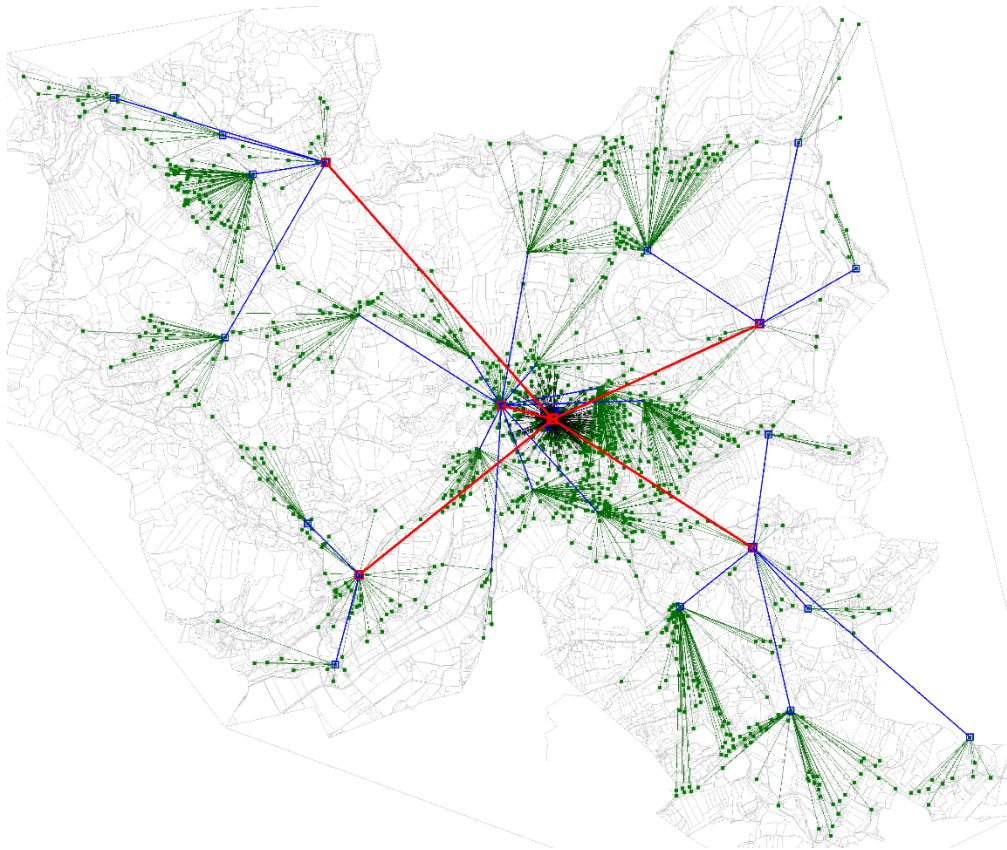


Abbildung 13. Ergebnis des Cluster-Modells wie in Abbildung 12 beschrieben; jedoch nunmehr mit nachfolgender Versorgungslängen Optimierung.

### 3.1.3.4 Das Modell *TerminalCluster*

Das Modell unterstützt das Clustering von Terminalknoten eine Graphen. Terminalknoten sind Knoten, denen zumindest ein Kabelauslass zugewiesen wird. Ein Cluster von Terminalknoten erfüllt die folgenden Forderungen:

- Die Distanz aller Knoten in einem Cluster ist höchstens gleich einer vorgegebenen Maximaldistanz. Wir sprechen dabei von einer hinreichenden räumlichen Nachbarschaft. Dabei werden zwei Distanz-Definitionen für Knotenpaare unterstützt: einerseits die Euklidische Punkt-zu-Punkt Distanz oder eine Distanz am Netzwerkgraphen bestimmt durch das Shortest-Path-Problem mit Längen-gewichteten Kanten – siehe z.B. (Jungnickel, 1999).
- Die Summe der potentiellen Einheiten aller Kabelauslässe, die den Knoten eines Cluster zugewiesen werden, ist höchstens gleich einer vorgegebenen Maximalanzahl.
- Ein Terminalknoten des Clusters wird als Cluster-Zentrum betrachtet, also jener Knoten von dem aus die restlichen Knoten des Clusters versorgt werden.

Das Clustering erfolgt gemäß den folgenden Schritten:

1. Sortiere die Terminalknoten aufsteigend nach ihren Distanzen zum Hauptverteiler-Knoten.
2. Solange es einen Terminalknoten gibt, der keinem Cluster zugewiesen wurde, führe aus:
  - a. Wähle den ersten noch nicht zugewiesene Terminalknoten und weise ihn als Cluster-Zentrum einem neuen Cluster zu.

- b. Generiere eine Liste von noch nicht zugewiesenen Terminalknoten, deren Distanz zum Cluster-Zentrum des aktuellen Clusters höchstens gleich der vorgegebenen Maximaldistanz ist; sortiere diese Liste ansteigend nach diesen Distanzen.
  - c. Füge solange Knoten dieser Liste zum aktuellen Cluster hinzu, solange dadurch die Maximalanzahl an potentiellen Einheiten pro Cluster nicht überschritten wird.
3. Für alle Terminalknoten führe aus:
- a. Für alle Cluster führe aus:
    - i. Wenn die Distanz des Terminalknoten zum Cluster-Zentrum des Clusters kleiner ist als die Distanz zum Cluster-Zentrum des ihn beinhaltenden Clusters, dann weise den Knoten dem Cluster zu.

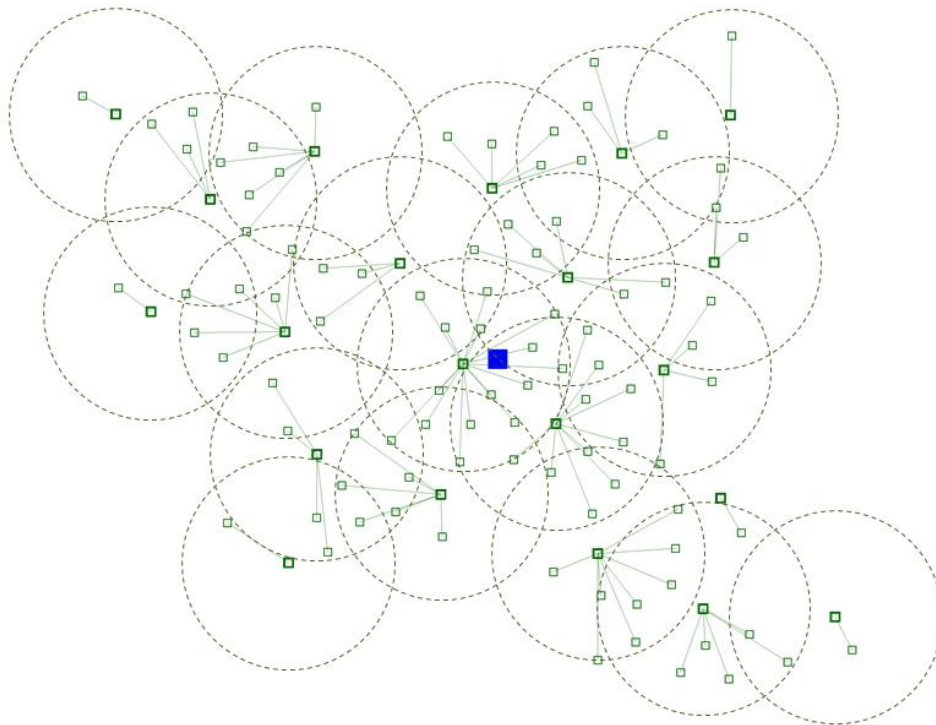


Abbildung 14. Ergebnis der Schritte 1 und 2 des Modells *TerminalCluster* für 115 Terminalknoten (grüne Quadrate) in Bezug auf den gegebenen Hauptverteiler-Standort (blaues Quadrat). Wir betrachten Euklidische Punkt-zu-Punkt Distanzen. Die Cluster-Zentren sind mit dicken Rahmenlinien hervorgehoben; Cluster-Zuordnungen von Terminalknoten sind durch ausgehende Strahlen von den jeweiligen Zentren skizziert; die Maximaldistanz wird durch die Kreise um die Zentren dargestellt. Die maximale Anzahl an potentiellen Einheiten pro Cluster ist unbeschränkt.

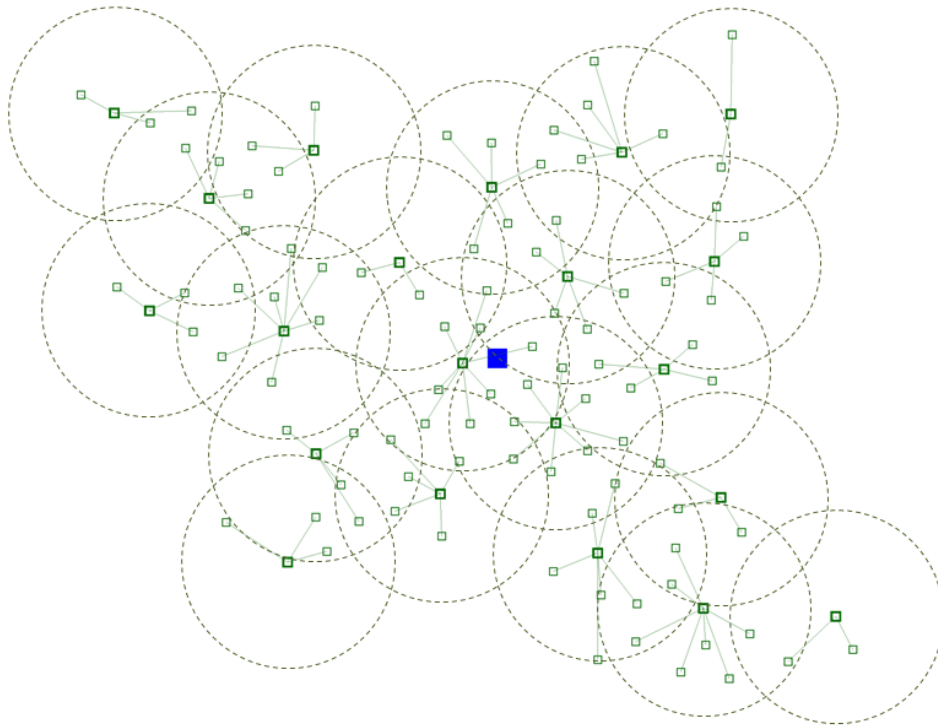


Abbildung 15. Ergebnis des Schrittes 3 des Modells *TerminalCluster* in Bezug auf das in Abbildung 14 dargestellte Beispiel.

### 3.1.4 Trassierungs-Modell

#### 3.1.4.1 Trassierungskosten einer Kante

Wir betrachten eine Kante des Netzwerkglyphen. Auf Basis der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Kanten-Attribute und der in Abschnitt 3.1.1 definierten Kosten-Parameter gehen wir wie folgt vor:  $\Omega$  sei die Menge der Landnutzungsklassen die der Kante zugeordnet sind. Für ein  $\omega \in \Omega$  seien mit  $c_\omega \in \mathbb{R}_+$  und  $b_\omega \in \{0,1\}$  die spezifischen Verlegekosten pro Meter für die entsprechende Landnutzung definiert und bestimmt ob auf der entsprechenden Landnutzung ein Wegerecht besteht oder nicht. Der Kostenparameter  $f_{wl} \in \mathbb{R}_+$  bestimmt die Kostenveränderung bei bestehendem Wegerecht. Die Länge der Kante sei mit  $l \in \mathbb{R}_+$  gegeben. Dann errechnen sich die Trassierungskosten der Kante gemäß

$$c = l \min_{\omega \in \Omega} c_\omega (1 - b_\omega (1 - f_{wl}))$$

#### 3.1.4.2 Bottom-up Trassierungs-Modell

Wir lösen zunächst im HV-Kreis und in allen Instanzen der End-Verteilkabelnetzebene ein Steiner-Baum Problem. Die Terminalknoten und das Cluster-Zentrum jeder Instanz bilden dabei die entsprechenden Steiner-Terminalknoten. Die Kantengewichte werden gemäß den Trassierungskosten des Abschnitts 3.1.4.1 gewählt.

Es werden zwei Approximations-Heuristiken zur Lösung des Problems unterstützt: ein shortest-path-tree- und ein minimum-spanning-tree-Ansatz. Für methodische Details verweisen wir an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur (Jungnickel, 1999). Die Kanten der entsprechenden Lösungsbäume entsprechen den räumlichen Terrassierungen der Netzwerke dieser Hierarchieebene.

Ebenso wird mit den Instanzen der höheren Hierarchieebenen (Zwischen-Verteilkabelnetze und Amtskabelnetz) verfahren.

Ein Modellparameter steuert die Nutzung von Synergie-Potentialen im Bereich der Trassierungskosten. In diesem Fall drehen wir die Simulationsrichtung auf top-down um; i.e. wir berechnen zunächst die Trassierung des Amtskabelnetzes, dann die der Zwischen-Verteilkabelnetze und letztlich die der End-Verteilkabelnetze und des HV-Kreises. Dabei werden die Gewichte jener Kanten, die bereits in der Trassierung von super-adjazenten Instanzen enthalten sind, bei der Lösung des Steiner-Baum Modelles einer Instanz mit Null (anstelle der oben beschriebenen Trassierungskosten) veranschlagt.

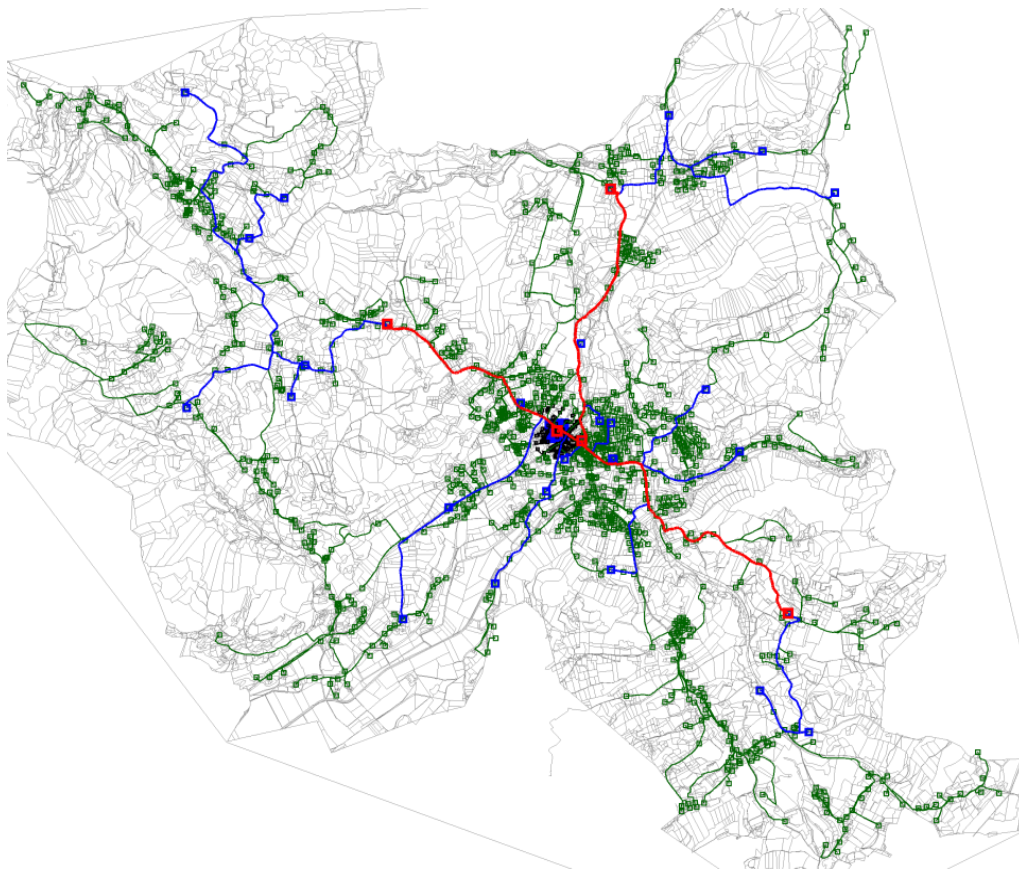


Abbildung 16. Ergebnis des Trassierungs-Modells für den Netzwerkgraphen 04276-02 (Feldkirchen/Kärnten) auf Basis des Ergebnisses des Cluster-Modells gemäß Abbildung 13 mit Nutzung der Synergiepotentiale für Trassierungskosten. Die Netzwerkhierarchien sind farblich unterschieden: rot = Amtskabelnetz, blau = Zwischen-Verteilkabelnetze, grün = End-Verteilkabelnetze, schwarz = HV-Kreis. Die spezifischen Verlegekosten sind für alle Landnutzungen ident gewählt, mit Ausnahme der Landnutzung „Strassenanlage“ – diese wurden mit dem Faktor 1/10 (gegenüber den restlichen Nutzungen) multipliziert.

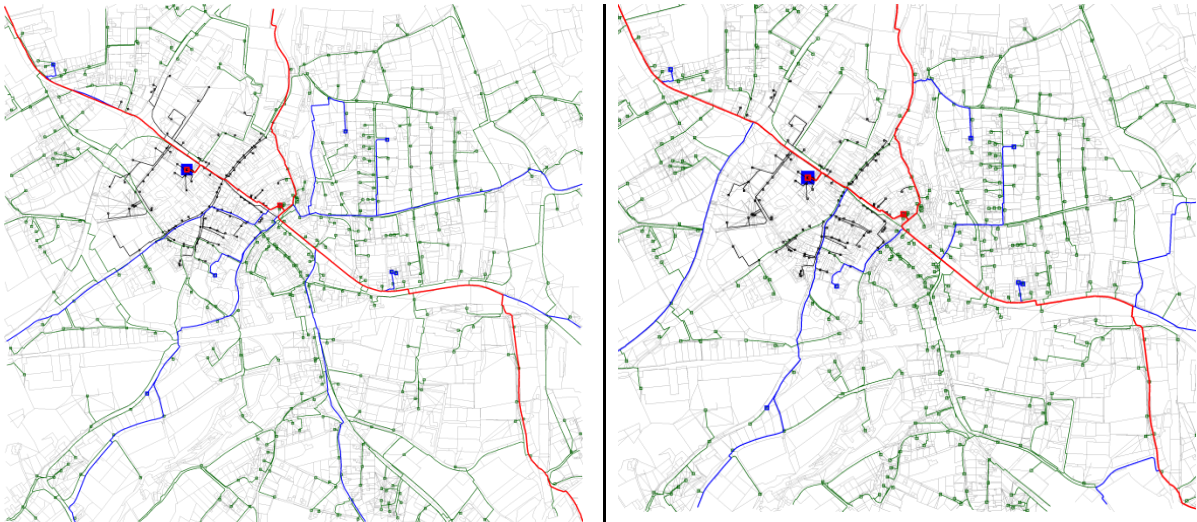
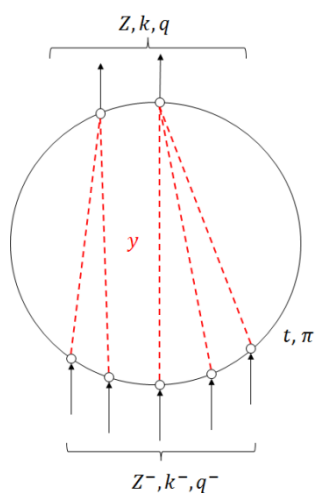


Abbildung 17. Ergebnisunterschied bei Nutzung der Synergiepotentiale für Trassierungskosten. Die linke Abbildung zeigt einen Ausschnitt der Instanz aus Abbildung 16. Die rechte Abbildung zeigt das Trassierungsergebnis der gleichen Instanz, jedoch nunmehr ohne Nutzung der Trassierungssynergie.

### 3.1.5 Hardware-Modell

#### 3.1.5.1 Das Modell $[Z, k, q, y] = \text{Cb1OnTerminal}[t, \pi, Z^-, k^-, q^-, \text{Type}]$

Wir betrachten einen beliebigen Knoten  $t$ , der im Trassierungsbaum einer beliebigen Instanz in einer beliebigen Netzwerkhierarchie enthalten ist. Die Größe  $\pi$  beschreibt den Bedarf (an Doppeladern zur Versorgung von zugewiesenen Kabelauslässen) des Knotens; wenn  $t$  ein Terminalknoten ist, so ist sein Bedarf größer Null; andernfalls gleich Null. Gegeben ist die



Menge  $Z^-$ , die alle aus Downstream-Richtung in den Knoten einmündenden Cu-Kabel beinhaltet. Wir kennen für jedes Kabel den Typ  $k^-$  (vergl. Abschnitt 3.1.1) und die Anzahl  $q^-$  der darin beschalteten Adern.

Wir treffen für das Modell die Annahme, dass (in späterer Folge) auf den Knoten eine oder eine Kombination von Cu-Hardwarekomponenten eines bestimmten Typs  $\text{Type}$  installiert werden.

Das Modell errechnet nunmehr eine Kosten-optimale Menge  $Z$ , die alle Cu-Kabel beinhaltet, die den Knoten  $t$  aus in Upstream-Richtung versorgen. Es werden von allen Kabeln deren Typ  $k$  und deren Anzahl  $q$  an beschaltenden Adern berechnet. Weiters wird mittels der Entscheidungsvariablen  $y$  die „Überführung“ der Kabel der Menge  $Z^-$  in die der Menge  $Z^+$  bestimmt. Dabei sind die folgenden Nebenbedingungen zu beachten:

- Jedes Kabel der Menge  $Z$  besitzt einen eindeutig bestimmten Kabeltyp.
- Es dürfen in einem Kabel der Menge  $Z$  nicht mehr Doppeladern beschalten werden, als dies der entsprechende Kabeltyp ermöglicht.
- Die Summe der beschalteten Doppeladern über alle in der  $Z$  enthaltenen Kabel muss mindestens gleich groß sein wie die Summe der beschalteten Doppeladern über alle in  $Z^-$  enthaltenen Kabel plus dem Bedarf des Knoten.
- Jedes Kabel in  $Z^-$  muss eindeutig in ein Kabel aus der Menge  $Z$  übergeführt werden.

- Die Summe der beschalteten Adernpaare über alle Kabel der Menge  $Z^-$  die in ein bestimmtes Kabel der Menge  $Z$  übergeführt werden, darf nicht größer sein als die Anzahl der im Kabel beschalteten Adern.
- Die Summe der Adernpaare über alle Kabel der Menge  $Z^-$  darf höchstens so groß sein wie die maximale Anzahl der Output-Ports über alle Hardware-Komponenten eines bestimmten Typs.

Die formal mathematische Modellierung lautet:

**Spezifikation.**  $[Z, k, q, y] = \text{CblOnTerminal}[t, \pi, Z^-, k^-, q^-, Type]$ .

- $t \in T$  ... Terminalknoten einer Netzebeneninstanz.
- $\pi \in \mathbb{N}$  ... Anzahl der Drop-Wires, die von  $t$  aus zu versorgen sind. Für Instanzen der Ebenen HV-Kreis oder End-Verteilkabelnetz gilt stets  $\pi > 0$ ; für höhere Netzebenen hingegen  $\pi = 0$ .
- $Z^-$  ... Menge der aus dem Downstream in  $t$  einmündenden Kabel.
- $q^- : Z^- \rightarrow \mathbb{N}$  ... ordnet jedem aus dem Downstream einmündenden Kabel eine Anzahl an beschalteten Doppeladern zu.
- $k^- : Z^- \rightarrow C_{Cu}$  ... ordnet jedem aus dem Downstream einmündenden Kabel einen Kabeltyp zu.
- $Z$  ... Menge an Kabeln die zur Versorgung von  $t$  verwendet werden.
- $k : Z \rightarrow C_{Cu}$  ... ordnet jedem Versorgungskabel einen Kabeltyp zu.
- $q : Z \rightarrow \mathbb{N}$  ... ordnet jedem Versorgungskabel eine Anzahl von beschalteten Adernpaaren zu.
- $y : Z^- \rightarrow Z$  ... ordnet jedem aus dem Downstream einmündenden Kabel ein Versorgungskabel zu.
- $Type$  ... Element der Menge  $\{KA, KV, AM\}$ , legt fest in welchen Cu-Komponenten Versorgungskabel aufzuführen sind.

**Modellannahmen.**  $Z$  sei die Menge der möglichen Kabel, die zur Versorgung von  $t$  eingesetzt werden können. Diese Menge wird bei der Modellinitialisierung generiert. Es gilt  $|Z| = \rho_{Cbl, \max}$ . Die Bezeichner  $z \in Z$  sind stets eindeutig; die Elemente von  $Z$  werden Zeit-gestempelt erstellt. Der Parameter  $t_{\max} = \max_{i \in K_{Cu}: t(i)=Type} \omega(i)$  bestimmt die größt-mögliche Anzahl an Doppeladern, die eine Komponenten vom Typ  $Type$  an ihren Output-Ports aufnehmen kann.

**Entscheidungsvariablen.**  $x(z, k) \in \{0, 1\}$  bestimmt ob das Kabel  $z \in Z$  vom Typ  $k \in C_{Cu}$  zur Versorgung von  $t$  verwendet wird;  $q(z) \in \mathbb{N}$  bestimmt die Anzahl der aktivierten Doppeladern im Kabel  $z \in Z$ .  $y(z', z) \in \{0, 1\}$  bestimmt ob ein Kabel  $z' \in Z^-$  in ein Kabel  $z \in Z$  übergeführt wird.

**Modell.**

$$\min_{x(z,k)} \sum_{z \in Z} \sum_{k \in C_{Cu}} x(z,k) c(k) \quad (2)$$

$$\sum_{k \in C_{Cu}} x(z,k) \leq 1 \quad \text{für alle } z \in Z \quad (3)$$

$$q(z) - \sum_{k \in C_{Cu}} x(z,k) t(k) \leq 0 \quad \text{für alle } z \in Z \quad (4)$$

$$\sum_{z \in Z} q(z) = \pi + \sum_{z' \in Z^-} q^-(z') \quad (5)$$

$$\sum_{z \in Z} y(z',z) = 1 \quad \text{für alle } z' \in Z^- \quad (6)$$

$$\sum_{z' \in Z^-} y(z',z) q^-(z') \leq q(z) \quad \text{für alle } z \in Z \quad (7)$$

$$\sum_{z' \in Z^-} y(z',z) t(k^-(z')) \leq t_{\max} \quad \text{für alle } z \in Z \quad (8)$$

(2) minimiert die Kabelkosten. (3) fordert, dass jedem Kabel höchstens ein Kabeltyp zugewiesen wird; (3) und (4) fordern: wenn in einem Kabel Adernpaare beschalten werden, dann muss der entsprechend zugewiesene Kabeltyp ausreichend Adernpaare verfügen; (5) fordert, dass die Gesamtanzahl an beschalteten Adernpaaren gleich der Summe der zu versorgenden Drop-Wires und aller aus dem Downstream einmündenden beschalteten Doppeladern entspricht; (6) fordert, dass jedes aus dem Downstream einmündende Kabel eindeutig in ein Versorgungskabel übergeführt wird; (7) fordert, dass die Summe der beschalteten Adernpaare über alle Kabel, die aus dem Downstream kommend in ein Versorgungskabel übergeführt werden, höchstens gleich der Anzahl der beschalteten Adernpaare im Versorgungskabel ist; beachte: (8) fordert, dass die Summe der Adernpaare über alle Kabel, die aus dem Downstream kommend in ein Versorgungskabel übergeführt werden, durch die Output-Ports der größt-möglichen Komponente aufgenommen werden kann.

**Generierung der Outputvariablen.** Auf Basis der Belegung der Entscheidungsvariablen gilt:

Output	Entscheidungsvariablen
Menge $Z$	$\left\{ z \in Z : \sum_{k \in C_{Cu}} x(z,k) > 0 \right\}$
$k : Z \rightarrow C_{Cu}$	einem $z \in Z$ mit $\sum_{k \in C_{Cu}} x(z,k) > 0$ ordne das eindeutig bestimmte $k \in C_{Cu}$ mit $x(z,k) > 0$ zu
$q : Z \rightarrow \mathbb{N}$	einem $z \in Z$ mit $\sum_{k \in C_{Cu}} x(z,k) > 0$ ordne $q(z)$ zu
$y : Z^- \rightarrow Z$	einem $z' \in Z^-$ ordne das eindeutig bestimmte $z \in Z$ mit $y(z',z) > 0$ zu

Wir beschreiben nachfolgend ein Beispiel-Ergebnis dieses Modells. Dazu betrachten wir die Kabeltypen gemäß der nachfolgenden Tabelle:



[1] Anzahl der Cu-Doppeladern	[2] Cu-Querschnitt einer Ader in Millimeter
[3] benötigte Künettenbreite in Meter	[4] maximale durchgängige Verlegelänge
[5] Kosten in EUR pro Meter (Solver)	[6] Kosten in EUR pro Meter
[7] Verlegelänge	[8] Verlegekosten in EUR

Id	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
1	10,00	0,40	0,10	500,00	0,40	0,40
2	50,00	0,40	0,10	500,00	1,00	1,60
3	180,00	0,40	0,10	500,00	2,00	7,30
4	680,00	0,40	0,10	500,00	5,00	20,90
5	1.800,00	0,40	0,10	500,00	10,00	66,50

Wir nehmen weiters an, dass fünf Kabel aus Downstream-Richtung kommend in einen Knoten einmünden. Der Knoten ist kein Terminal-Knoten (sein Demand ist Null). Die fünf Kabel sind im unten stehenden Protokoll mit D1 bis D5 bezeichnet bzw. unter `type id` und `nr. act. twin wires` erkennen wir die entsprechenden Kabeltypen und ihre Anzahl an beschalteten Doppeladern.

Local model Cb1OnTerminal on an arbitrary node w.r.t user defined input.

[IDlg\_RunModelCb1OnTerminal]

```

-----
[IDlg_pi]          demand of node                : 0
[IDlg_Z_minus]    downstr. inc. cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D1, 1, 3
[IDlg_Z_minus]    downstr. inc. cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D2, 1, 2
[IDlg_Z_minus]    downstr. inc. cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D3, 1, 2
[IDlg_Z_minus]    downstr. inc. cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D4, 2, 15
[IDlg_Z_minus]    downstr. inc. cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D5, 2, 30
[IDlg_Type]       type of copper node components (KA,KV,AM)             : AM
[IDlg_Solver]     MILP solver (lpsolve, cplex)                          : lpsolve
[IDlg_SolverTimeout] MILP solver timeout                               : 1
[IDlg_Export]     export models to lp files                             : false
-----

```

\* in order to create additional downstream incident cables copy the according input line;  
 \* if no downstream cables exist, simply delete all according lines;  
 \* press Ctrl+Shift+S to start the computation

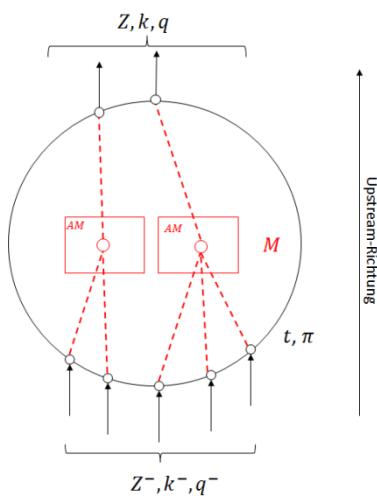
```

-----
initialize and solve model ...
done; elapsed cpu milliseconds = 16
display model messages ...
  initialize instance of model Cb1OnTerminal for t = 0 ...
  solve instance ...
    MILP solver = LPSOLVE
    MILP solver timeout = 1
  report model ...
  write report ...
  Cb1OnTerminal on node 0 (pi = 0):
  input:
    downstream incident cables:
      cable D1, type identifier = 1, nr. activated twin wires = 3
      cable D2, type identifier = 1, nr. activated twin wires = 2
      cable D3, type identifier = 1, nr. activated twin wires = 2
      cable D4, type identifier = 2, nr. activated twin wires = 15
      cable D5, type identifier = 2, nr. activated twin wires = 30
    type = KV
  theoretical number of upstream incident cables = 10
  output:
    best objective value = 1,4
    supplying cables:
      cable Cb1_N_000_00000, type identifier = 2, nr. activated twin wires = 48, | | |
    sum of discharged twin wires = 110
      cable Cb1_N_000_00001, type identifier = 1, nr. activated twin wires = 4, | | |
    sum of discharged twin wires = 20
    handover of downstream incident cables:
      cable D1 carried to supply cable Cb1_N_000_00000
      cable D2 carried to supply cable Cb1_N_000_00001
      cable D3 carried to supply cable Cb1_N_000_00001
      cable D4 carried to supply cable Cb1_N_000_00000
      cable D5 carried to supply cable Cb1_N_000_00000
done.
-----

```

Wir erkennen im Protokoll, dass zwei Kabel zur Versorgung des Knoten installiert werden, ihre technischen Bezeichnungen sind Cb1\_N\_000\_00000 (Cu-Kabel vom Typ 2 mit 48 beschalteten Adern) und Cb1\_N\_000\_00001 (Cu-Kabel vom Typ 1 mit 4 beschalteten Adern). Wir erkennen auch, dass die Kabel D1, D4 und D5 in das Kabel Cb1\_N\_000\_00000 und die Kabel D2 und D3 in das Kabel Cb1\_N\_000\_00001 übergeführt werden.

### 3.1.5.2 Das Modell $[M, i, \alpha, \omega] = \text{HrdWrOnTerminal}[t, \pi, Z^-, k^-, Z, k, q, \text{Type}]$



Die Input- und Outputvariablen des Modells `CblOnTerminal` bilden die Inputvariablen dieses Modells. Es bestimmt eine kosten-optimale Menge  $M$  von Cu-Komponenten am Knoten  $t$ , so dass eine physikalisch korrekte Überführung der Kabel aus dem Downstream in die des Upstream ermöglicht wird;  $\text{Type}$  beschreibt dabei wiederum die Komponentenart (KA, KV oder AM),  $i$  beschreibt dabei den Typ der Komponente,  $\alpha$  und  $\omega$  ordnen jedem Kabel eine jeweilige Upstream- und Downstream-Komponente zu.

Das Modell wird in zwei Modi betrieben. Modus A fordert, dass  $\pi = 0, Z^- \neq 0$  gilt und Modus B, dass vice versa  $\pi \neq 0, Z^- = 0$  gilt.

Die Bestimmung der Menge von Komponenten erfolgt unter den folgenden Nebenbedingungen, die abhängig vom jeweiligen Modus aktiviert werden:

- Jeder Komponente wird höchstens ein Typ zugewiesen; beachte in diesem Zusammenhang, dass  $M$  auch gleich der leeren Menge sein kann, wenn alle Downstream-seitigen Kabel unverändert Upstream-seitig weitergeführt werden.
- Die Maximalanzahl an Komponenten pro Typ darf nicht überschritten werden.
- Jedes Upstream-seitige Kabel muß in genau einer Komponente aufgeführt werden.
- Jedes Upstream-seitige Kabel, in das mindestens zwei Downstream-seitige Kabel einmünden, wird in genau einer Komponente aufgeführt.
- Jedes Upstream-seitige Kabel, in das höchstens ein Downstream-seitiges Kabel einmündet, wird in höchstens einer Komponente aufgeführt.
- Die Summe der Doppeladern aller Upstream-seitigen Kabel, die in einer Komponente aufgeführt werden, übersteigt nicht die Anzahl der Inputports der Komponente.
- Alle am Knoten existierenden Drop-Wires (Demand des Knoten) müssen in einer Komponente aufgeführt werden.
- Die Summe der Doppeladern aller aus dem Downstream in eine Komponente einmündenden Kabel darf höchstens gleich der Anzahl der Outputports der Komponente sein.

Die formal mathematische Modellierung lautet:

**Spezifikation.**  $[M, i, \alpha, \omega] = \text{HrdWrOnTerminal}[t, \pi, Z^-, k^-, Z, k, y, Type]$ .

- $t \in T$  ... Terminalknoten einer Netzebeneninstanz.
- $\pi \in \mathbb{N}$  ... Anzahl der Drop-Wires, die von  $t$  aus zu versorgen sind. Für Instanzen der Ebenen HV-Kreis oder End-Verteilkabelnetz gilt stets  $\pi > 0$ ; für höhere Netzebenen hingegen  $\pi = 0$ .
- $Z^-$  ... Menge der aus dem Downstream in  $t$  einmündenden Kabel.
- $k^- : Z^- \rightarrow C_{Cu}$  ... ordnet jedem aus dem Downstream einmündenden Kabel einen Kabeltyp zu.
- $Z$  ... Menge an Kabeln die zur Versorgung von  $t$  verwendet werden.
- $k : Z \rightarrow C_{Cu}$  ... ordnet jedem Versorgungskabel einen Kabeltyp zu.
- $y : Z^- \rightarrow Z$  ... ordnet jedem aus dem Downstream einmündenden Kabel ein Versorgungskabel zu.
- $Type$  ... Element der Menge  $\{KA, KV, AM\}$ , legt fest in welchen Cu-Komponenten Versorgungskabel aufzuführen sind.
- $M$  ... Menger der installierten Cu-Komponenten.
- $i : M \rightarrow K_{Cu}$  ... ordnet jeder installierten Cu-Komponente eine Typ zu.
- $\alpha : Z^- \cup Z \rightarrow M \cup Z^- \cup Z \cup \{\text{Null}\}$  ... ordnet jedem Kabel ein Downstream-inzidentes Objekt (Cu-Komponente oder Cu-Kabel zu), aus dem es hervorgeht.
- $\omega : Z^- \cup Z \rightarrow M \cup Z^- \cup Z \cup \{\text{Null}\}$  ... ordnet jedem Kabel ein Upstream-inzidentes Objekt (Cu-Komponente oder Cu-Kabel zu), in das es einmündet.

**Modellannahmen.**  $M$  sei die Menge der Cu-Komponenten, die in  $t$  installiert werden können. Diese Menge wird bei der Modellinitialisierung generiert. Dazu sei  $x(i)$  die Anzahl der Komponenten vom Typ  $i \in K_{Cu}$  mit  $t(i) = Type$  und wir lösen

$$|M| = \max_x \sum_i x(i) \quad \text{unter} \quad \sum_i x(i) \leq \rho_{Cu, \max} \quad \text{und} \quad 0 \leq x(i) \leq \rho_{\max}(i) \quad \text{für alle } i.$$

Die Bezeichner  $m \in M$  sind stets eindeutig; die Elemente von  $M$  werden Zeit-gestempelt erstellt.

**Entscheidungsvariablen.**  $w(m, i) \in \{0, 1\}$  bestimmt ob die Komponente  $m \in M$  vom Typ  $i \in K_{Cu}$  mit  $t(i) = Type$  auf dem Knoten  $t$  installiert wird.  $u(m, z) \in \{0, 1\}$  bestimmt, ob das Versorgungskabel  $z \in Z$  in der Komponente  $m$  aufgeführt wird.

**Modell.**

$$\min_m \sum_{m \in M} \sum_i w(m, i) c(i) \tag{9}$$

$$\sum_i w(m, i) \leq 1 \quad \text{für alle } m \in M \tag{10}$$

$$\sum_{m \in M} w(m, i) \leq \rho_{\max}(i) \quad \text{für alle } i \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} u(m, z) = 1 \quad \text{für alle } z \in Z \quad (12)$$

$$\sum_{m \in M} u(m, z) = 1 \quad \text{für alle } z \in Z : \sum_{z' \in Z^- : y(z')=z} 1 > 1 \quad (13)$$

$$\sum_{m \in M} u(m, z) \leq 1 \quad \text{für alle } z \in Z : \sum_{z' \in Z^- : y(z')=z} 1 \leq 1 \quad (14)$$

$$\sum_{z \in Z} u(m, z) - \sum_i w(m, i) k_{\max}(i) \leq 0 \quad \text{für alle } m \in M \quad (15)$$

$$\sum_{z \in Z} u(m, z) t(k(z)) - \sum_i w(m, i) \alpha(i) \leq 0 \quad \text{für alle } m \in M \quad (16)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_i w(m, i) \omega(i) \geq \pi \quad (17)$$

$$\sum_{z' \in Z^-} u(m, y(z')) t(k^-(z')) - \sum_i w(m, i) \omega(i) \leq 0 \quad \text{für alle } m \in M \quad (18)$$

(9) minimiert die Komponentenkosten.

(10) fordert, dass jeder Cu-Komponente höchstens ein Typ zugewiesen wird.

(11) fordert, dass die erlaubte Maximalanzahl an Cu-Komponenten pro Typ nicht überschritten werden darf.

(12) fordert, dass jedes Versorgungskabel in genau einer Cu-Komponente aufgeführt wird.

(13) fordert, dass jedes Versorgungskabel, in das mindestens zwei Kabel aus dem Downstream einmünden, in genau einer Cu-Komponente aufgeführt wird.

(14) fordert, dass jedes Versorgungskabel, in das höchstens ein Kabel aus dem Downstream einmündet, in höchstens einer Cu-Komponente aufgeführt wird.

(15) fordert gemeinsam mit (10): wenn in einer Cu-Komponente Versorgungskabel aufgeführt werden, so ist eine Komponente jenes Typs zu installieren, dessen Maximalanzahl an aufgeführten Kabeln ausreichend ist.

(16) fordert gemeinsam mit (10), dass die Summe der Doppeladern aller Versorgungskabel, die in einer Cu-Komponente aufgeführt werden, höchstens so groß ist wie die Anzahl der Input-Ports der Komponente.

(17) fordert, dass alle Drop-Wires in Cu-Komponenten aufgeführt werden können.

Für (18) beachte man: wenn das Versorgungskabel  $z$  an den Inputports der Komponente  $m$  aufgeführt wird, i.e.  $u(m, z) > 0$ , dann setzen wir voraus, dass alle Downstream-Kabel, die in  $z$  übergeführt werden, i.e. alle  $z' \in Z^-$  mit  $y(z') = z$ , ebenso an den Outputports von  $m$  aufgeführt werden. Damit kennen wir alle  $z' \in Z^-$  die an den Outputports von  $m$  aufgeführt werden; i.e.  $\{z' \in Z^- : u(m, y(z')) > 0\}$ . Damit fordert die Bedingung gemeinsam mit (10), dass die Summe der Doppeladern über alle Kabel, die aus dem Downstream in einer Komponente einmünden, höchstens gleich groß ist als die Anzahl der Output-Ports der Komponente.

Wir wenden dieses Modell exemplarisch auf das oben stehende Modellergebnis (siehe Abschnitt 3.1.5.1) an; wir wenden also den Modus A an: fünf aus dem Downstream kommende Kabel werden in zwei Upstream-seitige Kabel übergeführt und wir berechnen Kosten-optimale Abzweigmuffen um dies entsprechende physikalisch zu realisieren. Mit den Typen von Muffen zur Verfügung stehenden Typen

Cu-Komponenten:

- |                                |   |                               |
|--------------------------------|---|-------------------------------|
| [1] Anzahl Input-Ports         | [2] Anzahl Output-Ports                 | [3] Typ der Komponente        |
| [4] maximale Anzahl pro Knoten | [5] maximale Anzahl an Versorgungskabel | [6] Kosten pro Stück (Solver) |
| [7] Kosten pro Stück           | [8] Anzahl der installierten Stück      | [9] Kosten in EUR             |

id	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
6	10	10	AM	5	5	10,00	650,00
7	50	50	AM	5	5	20,00	1.100,00
8	180	180	AM	5	5	30,00	1.700,00
9	680	680	AM	5	5	40,00	2.200,00
10	1.800	1.800	AM	5	5	100,00	4.000,00

erhalten wir das Ergebnis gemäß dem folgenden Protokoll:

```
Local model HrdwronTerminal on an arbitrary node w.r.SARUSolverCall. specified user input.
[IDlg_RunModelHrdwronTerminal]
-----
[IDlg_pi] demand of node : 0
[IDlg_Z_minus] downstream incident cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D1, 1, 3
[IDlg_Z_minus] downstream incident cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D2, 1, 2
[IDlg_Z_minus] downstream incident cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D3, 1, 2
[IDlg_Z_minus] downstream incident cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D4, 2, 15
[IDlg_Z_minus] downstream incident cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : D5, 2, 30
[IDlg_Z] upstream supply cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : Cb1_N_000_00000, 2, 48
[IDlg_Z] upstream supply cable (id, type id, nr. act. twin pairs) : Cb1_N_000_00001, 1, 4
[IDlg_y] cable handover (id downstream cable, id upstream cable) : D1, Cb1_N_000_00000
[IDlg_y] cable handover (id downstream cable, id upstream cable) : D2, Cb1_N_000_00001
[IDlg_y] cable handover (id downstream cable, id upstream cable) : D3, Cb1_N_000_00001
[IDlg_y] cable handover (id downstream cable, id upstream cable) : D4, Cb1_N_000_00000
[IDlg_y] cable handover (id downstream cable, id upstream cable) : D5, Cb1_N_000_00000
[IDlg_Type] type of copper node components (KA,KV,AM) : AM
[IDlg_Solver] MILP solver (lpsolve, cplex) : lpsolve
[IDlg_Solver] MILP solver timeout : 1
[IDlg_Export] export models to lp files : false
-----
* in order to create additional downstream- or upsteam incident cables copy the according input line;
  if no downstream cables exist, simply delete all accoring lines;
* in order to create additional handover pairs, simply copy the according input line
* press Ctrl+Shift+S to start computation
-----
initialize and solve model ...
done; elapsed cpu milliseconds = 62
display model messages ...
  initialize instance of model HrdwronTerminal for t = 00000 ...
  solve instance ...
    MILP solver = LPSOLVE
    MILP solver timeout = 1
  grap solution from solver; solver status = OPTIMAL
report model ...
write report ...
model HrdwronTerminal on terminal node 0, demand = 0
input:
  upstream incident cables:
    cable Cb1_N_000_00000, type identifier = 2, nr. acrivated twin wires = 48
    cable Cb1_N_000_00001, type identifier = 1, nr. acrivated twin wires = 4
  downstream incident cables:
    cable D1, type identifier = 1, nr. acrivated twin wires = 3
    cable D2, type identifier = 1, nr. acrivated twin wires = 2
    cable D3, type identifier = 1, nr. acrivated twin wires = 2
    cable D4, type identifier = 2, nr. acrivated twin wires = 15
    cable D5, type identifier = 2, nr. acrivated twin wires = 30
  handover of downstream incident cables:
    cable D1 carried to cable Cb1_N_000_00000
    cable D2 carried to cable Cb1_N_000_00001
    cable D3 carried to cable Cb1_N_000_00001
    cable D4 carried to cable Cb1_N_000_00000
    cable D5 carried to cable Cb1_N_000_00000
  Type = AM
  theoretical number of copper components = 5
output:
  best objective value = 30
  installed copper node components:
    component Cmp_N_000_00001, type identifier = 8, type = AM, I/O ports = 180/180
    discharged upstream incident cables:
      cable Cb1_N_000_00000
      cable Cb1_N_000_00001
    discharged downstream incident cables:
      cable D1
      cable D4
      cable D5
      cable D2
      cable D3
  upstream information for downstream incident cables:
    cable D1 ends at cable/component Cmp_N_000_00001
    cable D2 ends at cable/component Cmp_N_000_00001
    cable D3 ends at cable/component Cmp_N_000_00001
    cable D4 ends at cable/component Cmp_N_000_00001
    cable D5 ends at cable/component Cmp_N_000_00001
  downstream information for upstream incident cables:
    Cb1_N_000_00000 starts from cable/component Cmp_N_000_00001
    Cb1_N_000_00001 starts from cable/component Cmp_N_000_00001
done.
```

Es wird eine Abzweigmuffe  $Cmp\_N\_000\_00001$  installiert, in der alle entsprechenden Kabel aufgeführt werden.

### 3.1.5.3 Hardware-Modell für eine Instanz einer Netzebene; das Modell *HrdWrOnSubNetw*

Das Modell bestimmt die physikalische Struktur des Cu-Netzwerkes in einer der Netzebenen-Hierarchien auf Basis einer gegebenen Trassierung (Ergebnis des Trassierungsmodells gemäß Abschnitt 3.1.4). Diese Trassierung entspricht einem Wurzelbaum  $B$ , wobei das Versorgungszentrum (Cluster-Zentrum) der Instanz die Wurzel definiert.

Bei der Bestückung von Knoten mit Cu-Komponenten gelten die folgenden Regeln:

- Auf jedem Knoten, dessen Grad im Wurzelbaum größer oder gleich drei ist, kann optional mit Abzweigmuffen bestückt werden. Die Entscheidung, ob mehrere Kabel aus dem Downstream in ein Upstream-seitiges Kabel zusammengefaßt werden sollen, ist Kosten-abhängig: wir vergleichen die Kosten der Weiterführung der Downstream-seitig einmündenden Kabel vom Knoten bis zum Versorgungszentrum der Instanz mit jenen des zusammenfassenden Kabels plus den entsprechenden Komponentenkosten.
- Auf Terminalknoten werden je Netzwerkhierarchie unterschiedliche Arten von Komponenten installiert. Für Instanzen der Ebenen HV-Kreis und End-Verteilkabelnetz werden Kabelauslässe, für Instanzen der Ebenen Zwischen-Verteilkabelnetz und Amtskabelnetz werden Kabelverteiler installiert. Wir bezeichnen die für das Modell jeweilig relevante Art mit *Type*.

Wir gehen anhand der folgenden Prozedur vor:

1. Initialisiere die Menge  $T_C$ ; diese beinhaltet alle Terminalknoten der Instanz sowie alle Knoten der Grad im Wurzelbaum größer oder gleich drei ist.
2. Initialisiere den Knotengrad für alle Knoten in  $T_C$ .
3. Solange ein Knoten  $t$  mit Grad eins in  $T_C$  existiert, führe aus:
  - a. Bestimme seinen Vorgängerknoten  $p$  im Wurzelbaum.
  - b. Wenn  $t$  ein Terminalknoten ist, dann führe aus:
    - i. Wenn  $Type = KA$  gilt (Kabelauslässe auf Terminalknoten), dann führe aus:  
 Löse  $[Z, k, q, 0] = CblOnTerminal[t, \pi, 0, 0, 0, KA]$  (bestimme Versorgungskabel um den Demand des Knoten zu decken).  
 Löse  $[M, i, \alpha, 0] = HrdWrOnTerminal[t, \pi, 0, 0, Z, k, 0, KA]$  (Bestimme Kabelauslässe um Kabel aufzuführen).  
 Speichere die Versorgungskabel  $Z$  als Downstream-seitig eingehende Kabel des Knoten  $p$ .
    - ii. Wenn  $Type = KV$  gilt (Kabelverteiler auf Terminalknoten), dann führe aus:  
 Löse  $[Z, k, q, y] = CblOnTerminal[t, \pi, 0, Z^-, q^-, KV]$  (bestimme Versorgungskabel um den Demand des Knoten und beschaltene Adern aller Downstream-seitigen Kabel zu decken).  
 Löse  $[M, i, \alpha, 0] = HrdWrOnTerminal[t, \pi, Z^-, q^-, Z, k, y, KV]$  (Bestimme Kabelverteiler um Down- und Upstream-seitige Kabel aufzuführen sowie die entsprechende Kabelrangierung).  
 Speichere die Versorgungskabel  $Z$  als Downstream-seitig eingehende Kabel des Knoten  $p$ .
  - c. Initialisiere mit  $Z^-$  alle Downstream-seitigen Kabel des Knoten  $t$ , die noch nicht in einer Komponente aufgeführt wurden.
  - d. Wenn  $Z^- \neq 0$  gilt, dann führe aus:

- i. Löse  $[Z, k, q, y] = \text{CblOnTerminal}[t, \pi, 0, Z^-, q^-, AM]$  (fasse die Downstream-seitigen Kabel in Upstream-seitigen Versorgungskabeln zusammen).
  - ii. Löse  $[M, i, \alpha, 0] = \text{HrdWrOnTerminal}[t, \pi, Z^-, q^-, Z, k, y, AM]$  (Bestimme Abzweigmuffen um Down- und Upstream-seitige Kabel aufzuführen sowie die entsprechende Kabelrangierung).
  - iii. Wenn die Kosten der Kabelzusammenführung plus den Kosten der dafür notwendigen Abzweigmuffen geringer sind als die Weiterführung der Downstream-seitigen Kabel, dann akzeptiere  $Z$  und  $M$ ; speichere die entsprechenden Versorgungskabel als Downstream-seitige Kabel des Knoten  $p$ .
4. Setze den Knotengrad von  $t$  auf Null und reduziere den Grad von  $p$  um Eins.

Nachfolgend zeigen wir exemplarisch das Ergebnis des Modells auf einer Instanz der End-Verteilnetzebene gemäß Abbildung 16. Die Instanz trägt die Bezeichnung  $\text{EVNt\_011}$  – der entsprechende Trassierungs-Wurzelbaum ist in Abbildung 18 dargestellt.

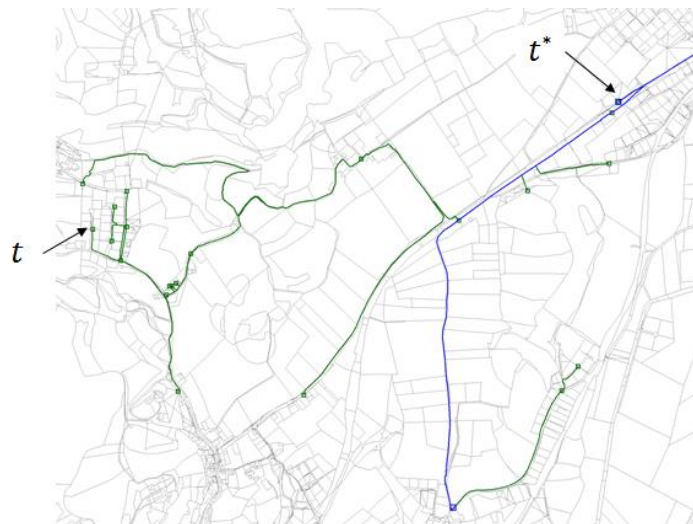


Abbildung 18. Instanz  $\text{EVNt\_011}$  mit Versorgungszentrum  $t^*$  und einem ausgewählten Terminalknoten  $t$ .

Wir betrachten die errechnete physikalische Versorgungsstruktur für einen ausgewählten Terminalknoten  $t$  mit der Bezeichnung 6235 bzw. dem darauf installierten Kabelauslass mit der Bezeichnung  $\text{Cmp\_EVNt\_011\_00095}$ .

```
[ID]g_GetCablePathInNetwork]
Analyzes the cable path for an object on a terminal node of a sub network.
The following objects are supported:
- copper node component on terminal node with a uniquely determined upstream incident cable
- a copper cable which is downstream incident to the terminal node
-----
[ID]g_NetwId] identifier of the sub network      : EVNt_011
[ID]g_t]      identifier of the terminal node   : 6235
[ID]g_Obj]    identifier of the object         : Cmp_EVNt_011_00095
-----
press Ctrl+Shift+S in order to start model with specified settings
-----
get upstream cable segments for specified object ...
report computed segments ...
  Cbl_EVNt_011_00190
    network = EVNt_011
    cable type id = 1 (nr. twin wires = 10)
    nr. activated twin wires = 10
    starts from component Cmp_EVNt_011_00095 (type = KA, I/O ports = 10/10) at node 6235
    runs along 23 edges at a total Lgth of 160,761843462726 towards the node 118547
  Cbl_EVNt_011_00204
    network = EVNt_011
    cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
    nr. activated twin wires = 32
    starts from component Cmp_EVNt_011_00101 (type = AM, I/O ports = 50/50) at node 118547
    runs along 13 edges at a total Lgth of 184,17242627639 towards the node 65104
  Cbl_EVNt_011_00225
    network = EVNt_011
    cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
```

```

nr. activated twin wires = 35
starts from component Cmp_EVnt_011_00110 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 65104
runs along 4 edges at a total Lgth of 8,32325056695829 towards the node 95718
Cb1_EVnt_011_00234
network = EVnt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 38
starts from component Cmp_EVnt_011_00115 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 95718
runs along 4 edges at a total Lgth of 25,9873447774336 towards the node 95377
Cb1_EVnt_011_00244
network = EVnt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 44
starts from component Cmp_EVnt_011_00120 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 95377
runs along 2 edges at a total Lgth of 8,65630761994959 towards the node 165647
Cb1_EVnt_011_00255
network = EVnt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from component Cmp_EVnt_011_00125 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 165647
runs along 2 edges at a total Lgth of 15,3653190840311 towards the node 165637
Cb1_EVnt_011_00271
network = EVnt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from identical downstream cable at node 165637
runs along 8 edges at a total Lgth of 107,499637948695 towards the node 147939
Cb1_EVnt_011_00293
network = EVnt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from identical downstream cable at node 147939
runs along 26 edges at a total Lgth of 322,665214718288 towards the node 173753
Cb1_EVnt_011_00294
network = EVnt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from identical downstream cable at node 173753
runs along 34 edges at a total Lgth of 426,075484832488 towards the node 136352
Cb1_EVnt_011_00324
network = EVnt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from identical downstream cable at node 136352
runs along 28 edges at a total Lgth of 330,44026007641 towards the node 172012
Cb1_EVnt_011_00327
network = EVnt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 74
starts from component Cmp_EVnt_011_00164 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 172012
runs along 14 edges at a total Lgth of 113,404926941058 towards the node 148210
Cb1_EVnt_011_00347
network = EVnt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 74
starts from identical downstream cable at node 148210
runs along 1 edges at a total Lgth of 0,0293339025325927 towards the node 165770
Cb1_EVnt_011_00360
network = EVnt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 84
starts from component Cmp_EVnt_011_00175 (type = AM, I/O ports = 680/680) at node 165770
runs along 13 edges at a total Lgth of 238,674160983893 towards the node 148217
Cb1_EVnt_011_00369
network = EVnt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 87
starts from component Cmp_EVnt_011_00180 (type = AM, I/O ports = 680/680) at node 148217
runs along 4 edges at a total Lgth of 52,6785112269735 towards the node 86622
Cb1_EVnt_011_00379
network = EVnt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 89
starts from component Cmp_EVnt_011_00185 (type = AM, I/O ports = 680/680) at node 86622
runs along 19 edges at a total Lgth of 287,402363606777 towards the node 148289
Cb1_EVnt_011_00405
network = EVnt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 89
starts from identical downstream cable at node 148289
runs along 23 edges at a total Lgth of 225,607626481433 towards the node 165803
Cb1_EVnt_011_00418
network = EVnt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 89
starts from identical downstream cable at node 165803
runs along 0 edges at a total Lgth of 0.0 towards the node 165803
visualize computed segments ...

```

Gemäß diesem Protokoll sehen wir dass, die versorgenden Kabel an mehreren Positionen in Abzweigmuffen aufgebracht und in neue Kabel übergeführt werden – siehe Abbildung 19. Wir erhalten damit einen durchgängigen physikalischen Versorgungspfad (Kabel-Versorgungspfad) für jedes Anschlussobjekt (Kabelausschuss oder Kabelverteiler).





Abbildung 19. Trassierung für den Kabelauslass `Cmp_EVNt_011_00095` bis zum Versorgungszentrum der Instanz. Die Positionen der Kabelverzweigungen (mittels Abzweigmuffen) sind durch orange Quadrate markiert.

### 3.1.5.4 Das globale Hardware-Modell

Um die physikalische Versorgung aller Kabelauslässe bis hin zum Hauptverteiler zu rechnen, wenden wir das Modell `HrdWrOnSubNetw` im bottom-up Modus über die einzelnen Netzwerkhierarchien an. Das Ergebnis ist ein Cu-Versorgungsnetz, in dem jeder Kabelauslass über einen eindeutigen physikalischen Versorgungspfad verfügt.

Die Abbildung 20 zeigt diesen Pfad exemplarisch für einen Kabelauslass; das unten folgende Protokoll beschreibt die entsprechenden Kabeln und Komponenten in Upstream-Richtung.

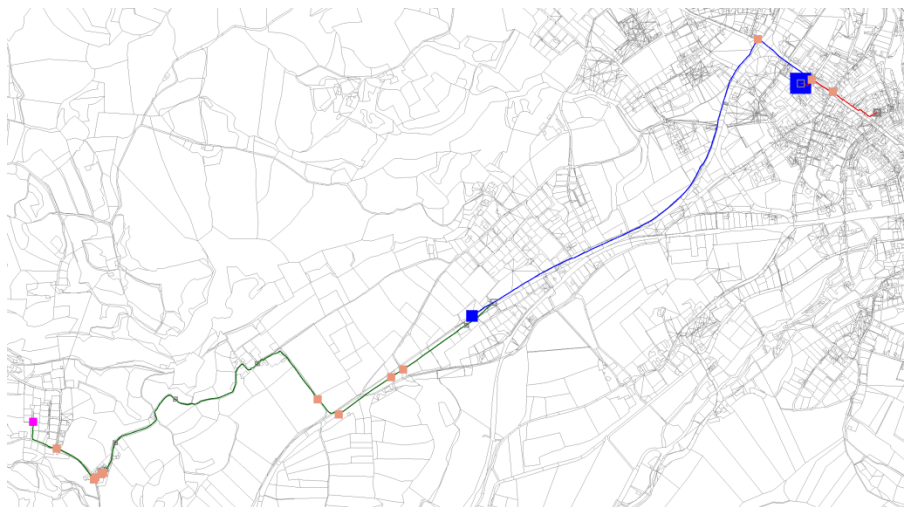


Abbildung 20. Kabelversorgungspfade des Kabelauslasses `Cmp_EVNt_011_00095` (rosa Quadrat) bis zum Hauptverteiler-Standort (großes blaues Quadrat) – vergleiche Abbildung 19. Die orangenen Quadrate symbolisieren Abzweigmuffen, das kleine blaue Quadrat zeigt einen Kabelverteiler.

```
[ID]g_GetCableSegmentsForCableExit]
Analyzes the cable segments for a cable exit in one of the lowest hierarchies
towards the main distribution frame.
-----
[ID]g_CblExit] identifier of cable exit : Cmp_EVNt_011_00095
-----
press Ctrl+Shift+S in order to start model with specified settings
-----
get cable segments for cable exit ...
report computed segments ...
  Cbl_EVNT_011_00190
    network = EVNT_011
    cable type id = 1 (nr. twin wires = 10)
    nr. activated twin wires = 10
    starts from component Cmp_EVNt_011_00095 (type = KA, I/O ports = 10/10) at node 6235
    runs along 23 edges at a total Lgth of 160,761843462726 towards the node 118547
  Cbl_EVNT_011_00204
    network = EVNT_011
    cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
    nr. activated twin wires = 32
    starts from component Cmp_EVNt_011_00101 (type = AM, I/O ports = 50/50) at node 118547
    runs along 13 edges at a total Lgth of 184,17242627639 towards the node 65104
  Cbl_EVNT_011_00225
```

```

network = EVNt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 35
starts from component Cmp_EVNt_011_00110 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 65104
runs along 4 edges at a total Lgth of 8,32325056695829 towards the node 95718
cb1_EVNt_011_00234
network = EVNt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 38
starts from component Cmp_EVNt_011_00115 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 95718
runs along 4 edges at a total Lgth of 25,9873447774336 towards the node 95377
cb1_EVNt_011_00244
network = EVNt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 44
starts from component Cmp_EVNt_011_00120 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 95377
runs along 2 edges at a total Lgth of 8,65630761994959 towards the node 165647
cb1_EVNt_011_00255
network = EVNt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from component Cmp_EVNt_011_00125 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 165647
runs along 2 edges at a total Lgth of 15,3653190840311 towards the node 165637
cb1_EVNt_011_00271
network = EVNt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from identical downstream cable at node 165637
runs along 8 edges at a total Lgth of 107,499637948695 towards the node 147939
cb1_EVNt_011_00293
network = EVNt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from identical downstream cable at node 147939
runs along 26 edges at a total Lgth of 322,665214718288 towards the node 173753
cb1_EVNt_011_00294
network = EVNt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from identical downstream cable at node 173753
runs along 34 edges at a total Lgth of 426,075484832488 towards the node 136352
cb1_EVNt_011_00324
network = EVNt_011
cable type id = 2 (nr. twin wires = 50)
nr. activated twin wires = 47
starts from identical downstream cable at node 136352
runs along 28 edges at a total Lgth of 330,44026007641 towards the node 172012
cb1_EVNt_011_00327
network = EVNt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 74
starts from component Cmp_EVNt_011_00164 (type = AM, I/O ports = 180/180) at node 172012
runs along 14 edges at a total Lgth of 113,404926941058 towards the node 148210
cb1_EVNt_011_00347
network = EVNt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 74
starts from identical downstream cable at node 148210
runs along 1 edges at a total Lgth of 0,0293339025325927 towards the node 165770
cb1_EVNt_011_00360
network = EVNt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 84
starts from component Cmp_EVNt_011_00175 (type = AM, I/O ports = 680/680) at node 165770
runs along 13 edges at a total Lgth of 238,674160983893 towards the node 148217
cb1_EVNt_011_00369
network = EVNt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 87
starts from component Cmp_EVNt_011_00180 (type = AM, I/O ports = 680/680) at node 148217
runs along 4 edges at a total Lgth of 52,6785112269735 towards the node 86622
cb1_EVNt_011_00379
network = EVNt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 89
starts from component Cmp_EVNt_011_00185 (type = AM, I/O ports = 680/680) at node 86622
runs along 19 edges at a total Lgth of 287,402363606777 towards the node 148289
cb1_EVNt_011_00405
network = EVNt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 89
starts from identical downstream cable at node 148289
runs along 23 edges at a total Lgth of 225,607626481433 towards the node 165803
cb1_EVNt_011_00418
network = EVNt_011
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 89
starts from identical downstream cable at node 165803
runs along 0 edges at a total Lgth of 0.0 towards the node 165803
cb1_ZVnt_000_00148
network = ZVnt_000
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 98
starts from component Cmp_ZVnt_000_00074 (type = KV, I/O ports = 680/680) at node 165803
runs along 15 edges at a total Lgth of 95,0811402201805 towards the node 116646
cb1_ZVnt_000_00283
network = ZVnt_000
cable type id = 3 (nr. twin wires = 180)
nr. activated twin wires = 98
starts from identical downstream cable at node 116646
runs along 182 edges at a total Lgth of 1459,68580934743 towards the node 159676
cb1_ZVnt_000_00291

```

```

network = ZVnt_000
cable type id = 4 (nr. twin wires = 680)
nr. activated twin wires = 524
starts from component Cmp_ZVnt_000_00140 (type = AM, I/O ports = 1800/1800) at node 159676
runs along 49 edges at a total Lgth of 342,197163229974 towards the node 168896
cb1_ZVnt_000_00308
network = ZVnt_000
cable type id = 4 (nr. twin wires = 680)
nr. activated twin wires = 665
starts from component Cmp_ZVnt_000_00145 (type = AM, I/O ports = 1800/1800) at node 168896
runs along 55 edges at a total Lgth of 202,148249936845 towards the node 146947
cb1_ZVnt_000_00325
network = ZVnt_000
cable type id = 4 (nr. twin wires = 680)
nr. activated twin wires = 665
starts from identical downstream cable at node 146947
runs along 0 edges at a total Lgth of 0.0 towards the node 146947
cb1_AKnt_00076
network = AKnt
cable type id = 4 (nr. twin wires = 680)
nr. activated twin wires = 665
starts from identical downstream cable at node 146947
runs along 69 edges at a total Lgth of 293,373229621701 towards the node 76374
cb1_AKnt_00083
network = AKnt
cable type id = 5 (nr. twin wires = 1800)
nr. activated twin wires = 1295
starts from component Cmp_AKnt_00035 (type = AM, I/O ports = 1800/1800) at node 76374
runs along 33 edges at a total Lgth of 56,1762232680189 towards the node 137656
cb1_AKnt_00099
network = AKnt
cable type id = 5 (nr. twin wires = 1800)
nr. activated twin wires = 1295
starts from identical downstream cable at node 137656
runs along 0 edges at a total Lgth of 0.0 towards the node 137656
visualize computed segments ...

```

Die Abbildung 21 zeigt das gesamte emulierte Cu-Netzwerk.

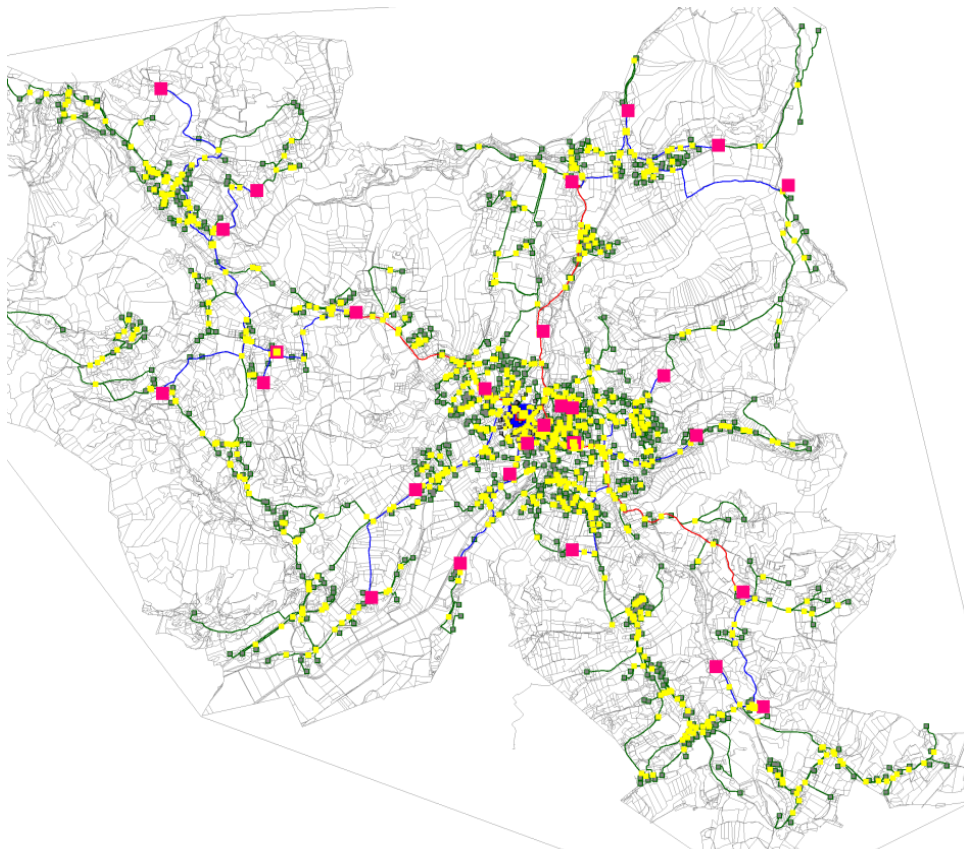


Abbildung 21. Emuliertes Cu-Netzwerk für den Anschlussbereich 04267-02 (Feldkirchen/Kärnten). Die grünen, blauen und roten Linien symbolisieren Cu-Kabeltrassen der einzelnen Netzwerk-Hierarchien. Die grünen Quadrate sind Positionen von Kabelauslässen. Die gelben Quadrate markieren Muffen und die magenta Quadrate sind Standorte von Kabelverteilern.

## 3.2 Der Leerrohr-Generator

### 3.2.1 Spezifikation, Workflow und Steuerung

Der Leerrohr-Generator emuliert Leerrohr-Infrastruktur auf Basis einer gegebenen Cu-Netzwerkinfrastruktur. Diese Infrastruktur ist in einem Netzwerkgraphen abgebildet – vergleiche Abschnitt 2 bzw. Abschnitt 3.1.

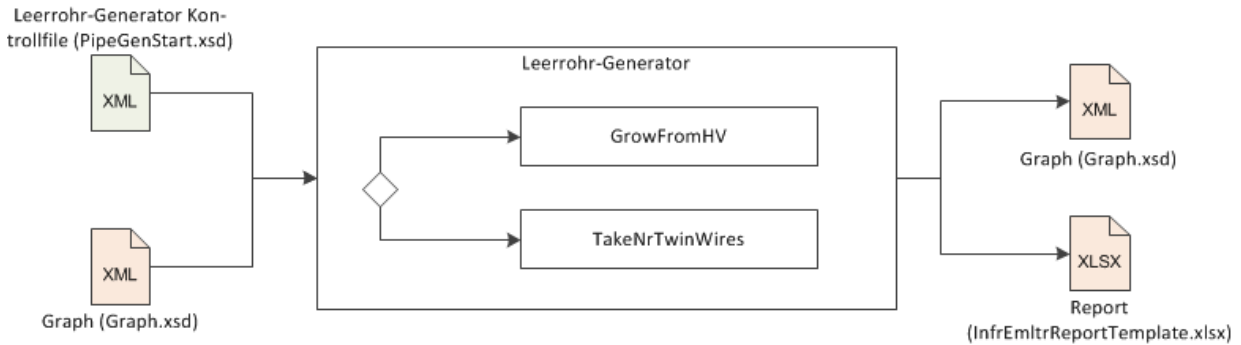


Abbildung 22. Workflow des Leerrohr-Generators.

Unter einem Leerrohr (oder Restrohr) verstehen wir eine vorhandene Verrohrung, in die ein oder mehrere Einhüllrohre (Duct) eingebracht (eingezogen, eingeblasen etc.) werden können. Für die weitere Modellierung gehen wir von einem Standardrohr mit einem Durchmesser von  $\rho_{max}$  Millimetern aus. Die Gesamt-Kupferbreite  $b_{Cu}$  auf einer Kante des Netzwerkgraphen wird über die Summe der Doppeladern-Paare mal dem entsprechenden Adern-Querschnitt berechnet. Die Gesamt-Leerrohr-Kapazität (Gesamt-Restrohr-Kapazität)  $\rho_{ges}$  einer Kante wird nun über die Annahme bestimmt, dass die Gesamt-Kupferbreite  $b_{Cu}$  bereits einen  $p_{Cu}$ -Anteil aller auf der Kante vorhandenen Rohre belegt. Wir stellen dabei jedoch sicher dass  $\rho_{ges}$  einen gegebenen Maximalwert von  $\rho_{Sum,max}$  nicht überschreitet. Damit gilt:

$$\rho_{ges} = \min\{b_{Cu}(1/p_{Cu} - 1), \rho_{Sum,max}\}$$

Die Abbildung 23 zeigt die Vorgehensweise schematisch. Wir bestimmen nunmehr so viele Leerrohre, wie der angenommene Durchmesser  $\rho_{max}$  in  $\rho_{ges}$  enthalten ist; diese verfügen dann auch über die entsprechende Leerrohr-Kapazität (Restrohr-Kapazität). Der restliche Anteil von  $b_{ges}$  wird einem Leerrohr mit entsprechend verringerter Kapazität zugewiesen. Siehe auch Abbildung 24 für ein Daten-numerisches Beispiel.

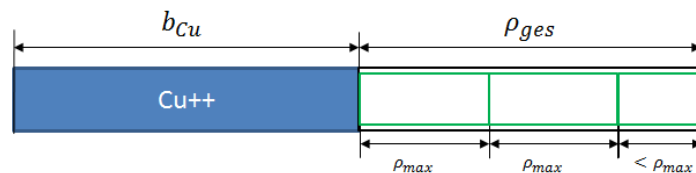


Abbildung 23. Bestimmung der Gesamt- Leerrohr-Kapazität einer Kante ( $p_{Cu} \approx 0.6$ ) sowie die der Kapazitäten der einzelnen Leerrohre.

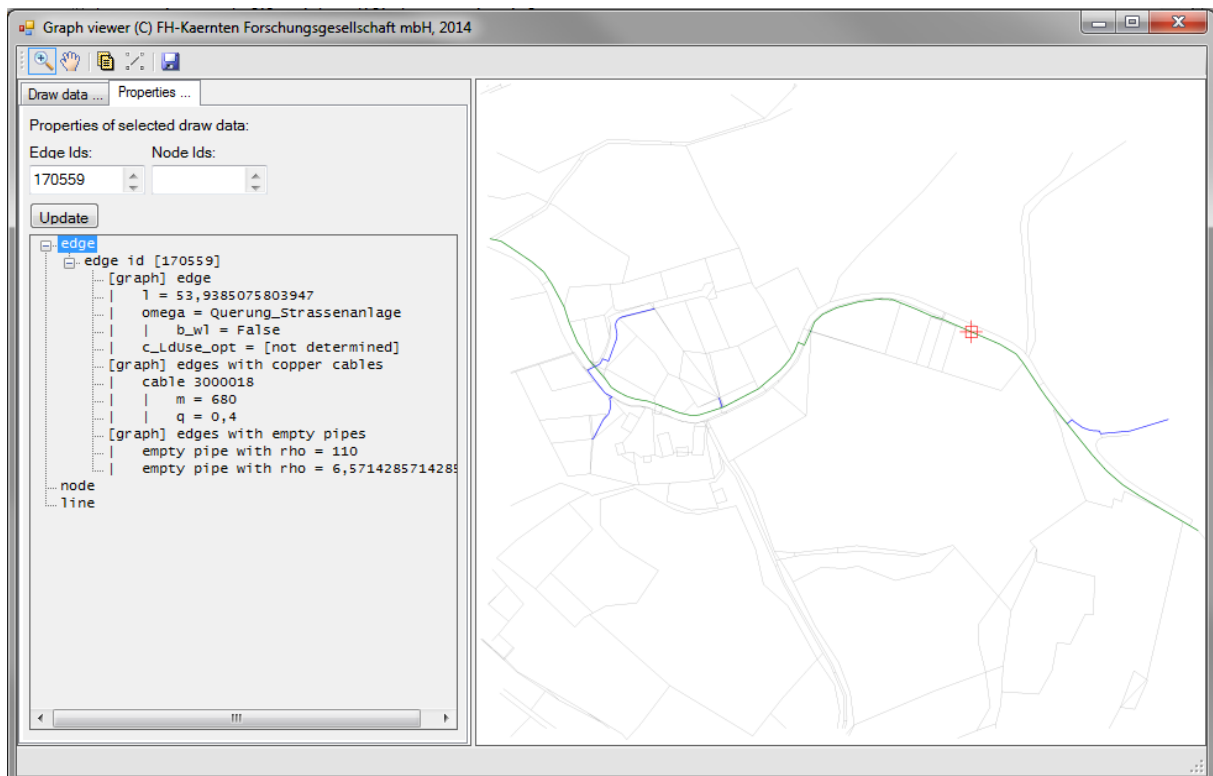


Abbildung 24. Numerisches Beispiel zur Bestimmung von Leerrohren und deren Kapazität. Wir betrachten die Kante mit der Bezeichnung 170559. Entlang dieser ist ein Cu-Kabel mit 680 Doppeladern mit Adern-Querschnitt 0.4 Millimeter installiert. Damit gilt  $b_{Cu} = 272$  Millimeter. Unter der Annahme  $p_{Cu} = 0.7$  folgt, dass  $\rho_{ges} = 116.57$  Millimeter. Wenn wir nun  $\rho_{max} = 110$  Millimeter annehmen, so wird ein Leerrohr mit voller Kapazität und eines mit Kapazität von 6.57 Millimeter berücksichtigt.

Die Auswahl der Kanten des Netzwerkgraphen, die mit Leerrohr-Infrastruktur belegt werden, erfolgt optional über eines der beiden Modelle `GrowFromHV` oder `TakeNrTwinWires` - siehe Abschnitte 3.2.2 und 3.2.3. Die Auswahl wird über das Leerrohr-Generator Kontrollfile gesteuert.

### 3.2.2 Das Modell `GrowFromHV`

Wir betrachten die Kupfer-Gesamtlänge  $L_{tot}$  der Netzwerkinstanz. Diese errechnet sich aus der Summe der Längen aller Kanten des Graphen, auf denen Cu-Infrastruktur existiert. Das Modell installiert nun ausgehend vom Hauptverteiler-Standort solange Leerrohr-Infrastruktur auf Kanten mit Cu-Infrastruktur bis die Summe deren Länge einem  $p$ -fachen Anteil von  $L_{tot}$  entspricht. Dabei werden Kanten je nach Anzahl der installierten Doppeladern priorisiert.

Optional soll die oben beschriebene Vorgehensweise auch auf „Teilbereiche“ der gegebenen Cu-Infrastruktur anwendbar sein. Wir greifen dabei auf die Methodik des Cu-Generators zurück: die Bezeichner der emulierten Cu-Kabel sind aufsteigend nach Netzwerk-Hierarchie vergeben, wobei die jeweiligen Obergrenzen pro Hierarchie standardisiert sind. Wir definieren daher einen minimalen Kabelbezeichner  $c_{min}$  und vernachlässigen alle Kabel, deren Bezeichner geringer ist. Dies erlaubt das Reduzieren der Input-Cu-Infrastruktur auf die entsprechenden Hauptversorgungsäste (z.B. nur Amtskabelnetz oder Amtskabel- und Zwischen-Verteilkabelnetz).

Wir gehen anhand der folgenden Prozedur vor:

1.  $F$  sei die Menge aller Kanten mit mindestens einem Cu-Kabel mit Bezeichner größer oder gleich  $c_{min}$ .
2. Alle Kanten in  $F$  sind unmarkiert.
3. Initialisiere eine leere Priority-Queue  $Q$  (Priorität wird dabei im Sinne von Penalties definiert; i.e. je geringer der Penalty, desto höher wird die Priorität des Elementes bewertet).
4. Füge in  $Q$  eine beliebige Kante, die inzident zum Hauptverteiler-Standort ist, mit Priorität  $1/b_{Cu}$  ein.
5. Initialisiere die aktuelle Länge  $L = 0$ .
6. Solange  $Q$  nicht leer ist und  $L < pL_{tot}$  gilt, führe aus:
  - a. Entnehme die Kante  $e$  aus  $Q$ ; die Länge von  $e$  sei mit  $l$  gegeben.
  - b. Bestimme die Gesamt-Leerrohr-Kapazität  $\rho_{ges}$  der Kante  $e$ .
  - c. Bestimme die Leerrohre und deren Kapazitäten gemäß der Parameter  $p_{Cu}$ ,  $\rho_{max}$  und  $\rho_{sum,max}$  wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben
  - d. Update  $L_{tot} = L_{tot} + l$ .
  - e. Markiere die Kante  $e$ .
  - f. Für alle Kanten  $f$  in  $F$ , die zur Kante  $e$  inzident, unmarkiert und nicht in  $Q$  enthalten sind, führe aus: füge  $f$  in  $Q$  mit Priorität entsprechender Priorität  $1/b_{Cu}$  ein.

Die Steuerung der entsprechenden Modell-Parameter erfolgt über das Leerrohr-Generator-Kontrollfile. Die Abbildung 25 zeigt ein Beispiel zur oben beschriebenen Vorgehensweise.

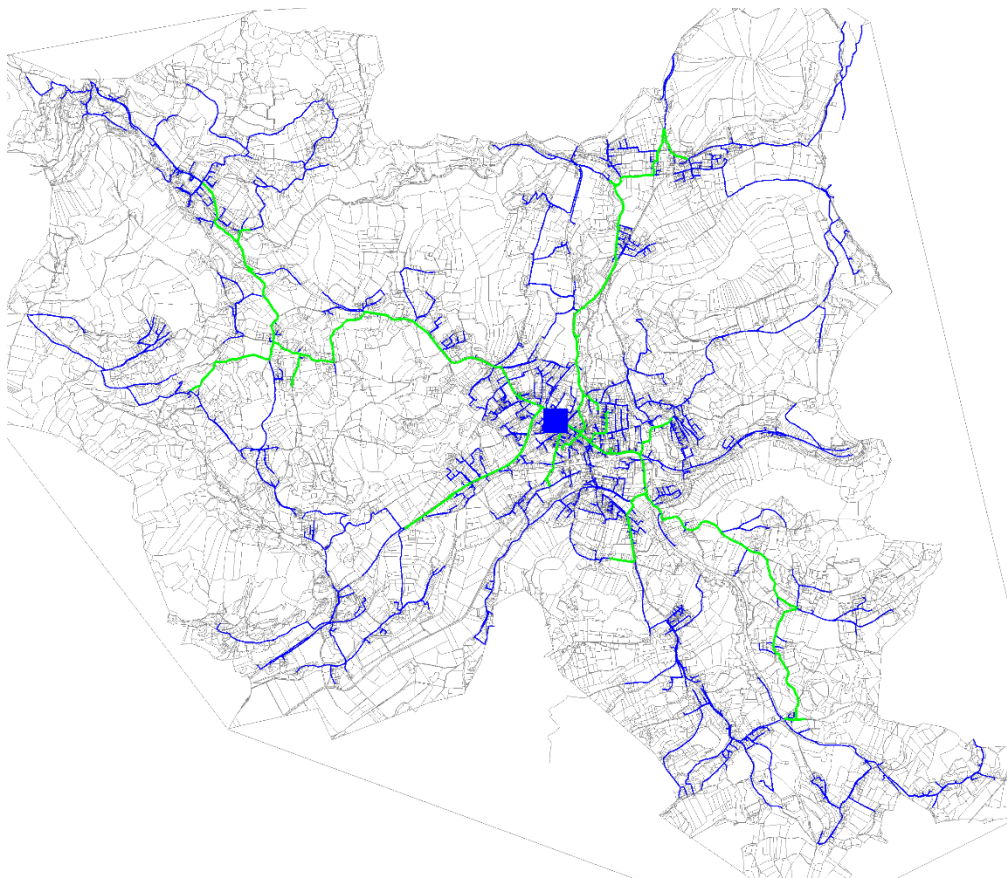


Abbildung 25. Emulierte Leerrohr-Infrastruktur (grün) auf Basis der emulierten Cu-Infrastruktur (blau) gemäß Abbildung 21. Es wurde das Modell *GrowFromHV* mit der folgenden Parametrierung angewendet:  $c_{min}$  wurde

derart gewählt, dass nur Kanten, die Cu-Infrastruktur der Hierarchien Amtskabelnetz und Zwischen-Verteilkabelnetz beinhalten, betrachtet werden. Daraus folgt eine Kupfer-Gesamtlänge  $L_{\text{tot}} = 37334,23$  [Meter].  $p = 0.7$ ; d.h. wir installieren ausgehend vom Hauptverteiler-Standort solange Leerrohre bis 70% der Kupfer-Gesamtlänge erreicht wird.

### 3.2.3 Das Modell TakeNrTwinWires

Wir betrachten nunmehr alle Kanten des Netzwerkgraphen, die über Cu-Infrastruktur verfügen. Wenn entlang einer Kante eine Kombination von Cu-Kabeln installiert wurde, so dass die Summe der darin enthaltenen Cu-Doppeladern größer als ein vorgegebener Parameter  $t_{\text{min}}$  ist, dann wird auf dieser Kante Leerrohr-Infrastruktur installiert. Die Anzahl und Dimensionierung der Leerrohre erfolgt dabei wiederum auf Basis der Parameter  $p_{\text{Cu}}$ ,  $\rho_{\text{max}}$  und  $\rho_{\text{Sum,max}}$  gemäß Abschnitt 3.2.1. Die Steuerung der entsprechenden Modell-Parameter erfolgt über das Leerrohr-Generator-Kontrollfile. Die Abbildung 26 zeigt ein entsprechendes Beispiel.

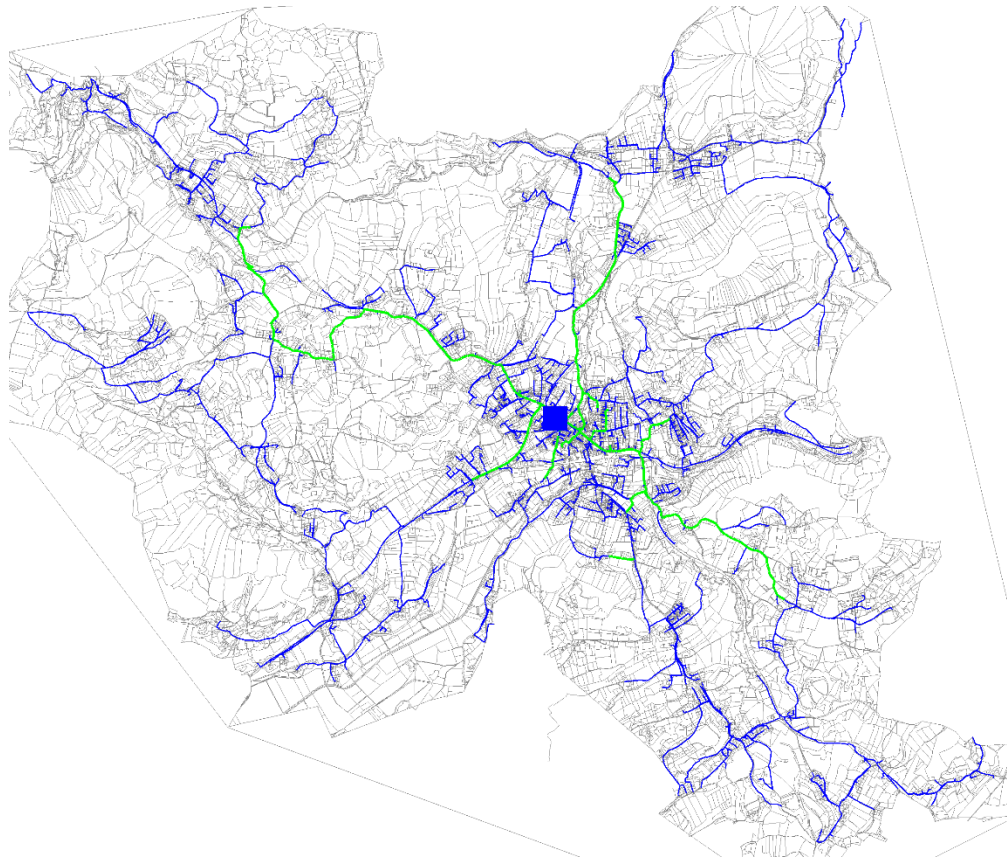


Abbildung 26. Emulierte Leerrohr-Infrastruktur (grün) auf Basis der emulierten Cu-Infrastruktur (blau) gemäß Abbildung 21. Es wurde das Modell *TakeNrTwinWires* mit der folgenden Parametrierung angewendet:  $t_{\text{min}} = 500$ ; wir installieren Leerrohr-Infrastruktur auf allen Kanten, die über mindestens 500 Cu-Doppeladern verfügen (dies sind in diesem Fall ca. 9% aller Kanten mit Cu-Infrastruktur).

## 3.3 Der Fiber-Generator

Der Fiber-Generator emuliert auf Basis einer bestehenden Cu-Infrastruktur (siehe Abschnitt 3.1) und einer optional bestehenden Leerrohr-Infrastruktur (siehe Abschnitt 3.2) eine bestehende Glasfaser-Infrastruktur. Wir setzen dazu den in Abschnitt 4 beschriebenen NGA Solver ein, wobei wir ein reines FTTb-Szenario betrachten und die FTTb-Quota über einen Parameter im Kontrollfile des Fiber-

Generators gesteuert wird. Das Modell liefert uns eine entsprechende Glasfasertrassierung, wobei wir für jede Kante dieser Trassierung mit  $f_{exist}$  die Anzahl der existierenden Fasern kennen. Diese werden als bereits beschaltene Fasern betrachtet. Mit einem parametrierbaren Reservefaktor  $r \in (0,1)$  bestimmen wir einen prozentuellen Overhead  $d = \lceil f_{exist}r \rceil$  zu den existierenden Fasern und betrachten diese als nutzbare Fasern. Damit ergibt eine Gesamt-anzahl an  $f = f_{exist} + d$  Fasern pro Kante.

Die Abbildung 27 zeigt ein exemplarisches Ergebnis.

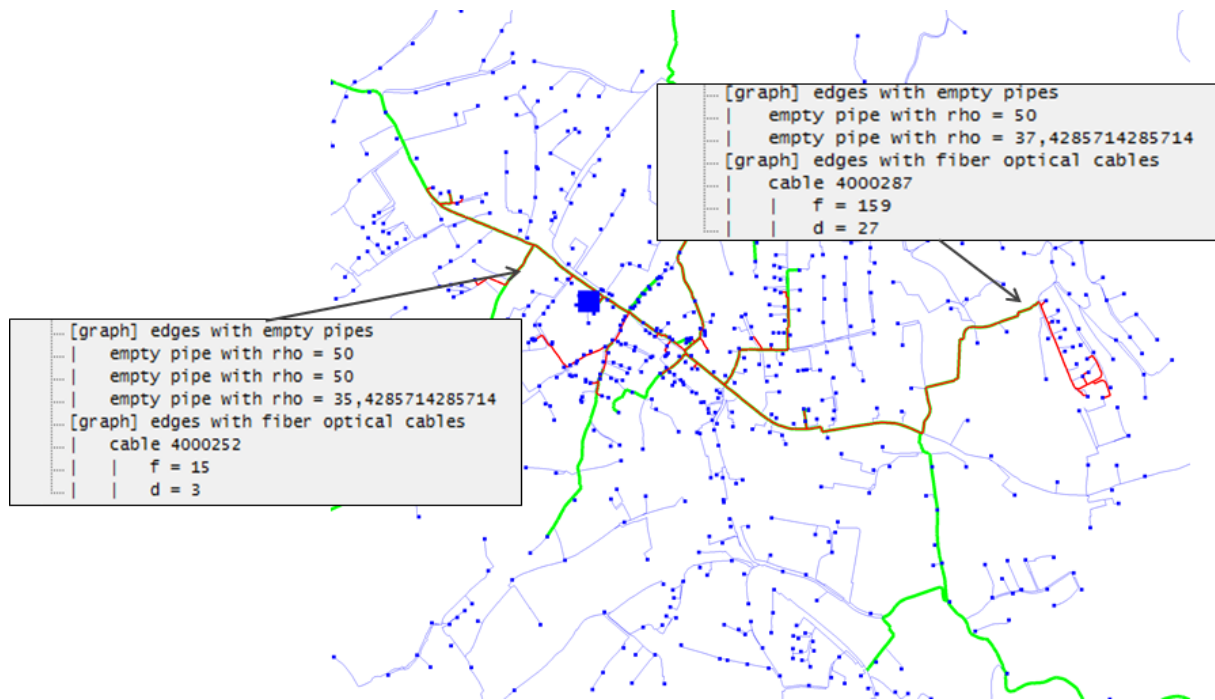


Abbildung 27. Ergebnis des Fiber-Generators auf Basis der Daten gemäß Abbildung 26. Es wurde eine FTtb-Quota von 20% gewählt. Kanten mit emulierter Glasfaser-Infrastruktur sind rot dargestellt.

### 3.4 Betriebsmodi des Infrastruktur-Emulator

Der Emulator unterstützt die folgenden Betriebsmodi – siehe dazu auch den in Abbildung 1 Workflow. Die Auswahl des Modus erfolgt im Emulator-Kontrollfile.

Modus	Cu-Generator	Leerrohr-Generator	Fiber-Generator
Cu-Emulation	X		
Cu-Leerrohr-Emulation	X	X	
Cu-Fiber-Emulation	X		X
Gesamt-Emulation	X	X	X



## 4 Der NGA-Solver

### 4.1 Spezifikation, Daten und Steuerung

#### 4.1.1 Spezifikation Workflow, Input- und Output-Daten

Der NGA Solver simuliert die Erweiterung einer existierenden Festnetz-Infrastruktur unter dem Prinzip der Kosten-Optimierung. Die Input-Daten des Solver sind in Form eines Netzwerkgraphen gegeben; dieser beinhaltet die folgenden teilweise optionalen Informationen:

- Cu-Netzwerk zur Versorgung aller im Graphen enthaltenen Kabelauslässe. Ein entsprechendes Netzwerk kann mit dem Cu-Generator (siehe Abschnitt 3.1) emuliert werden. Die Existenz eines derartigen Netzwerkes ist verpflichtend für den Betrieb des NGA-Solver.
- Leerrohr-Netzwerk und Glasfaser-Infrastruktur. Diese Infrastrukturen können jeweils mit dem Leerrohr- und dem Fiber-Generator (siehe Abschnitte 3.2 und 3.3) emuliert werden und sind für den Betrieb des NGA-Solver nicht zwingend notwendig.

Die Solver-Spezifikation: unter Berücksichtigung der gegebenen Kosten- und Hardware-Parameter führe zu geringsten Kosten aus:

- Platziere eine Menge von Access-Remote-Units (ARUs, Outdoor-DSLAMs), so dass ein vorgegebener Prozentsatz an potentiellen Einheiten über mit einer geforderten Übertragungsgüte über das bestehende Cu-Netzwerk versorgt werden können. Als Maß für die Übertragungsgüte werden drei Optionen unterstützt: Maximaldistanz, Maximaldämpfung sowie Mindestbitrate unter Berücksichtigung des Cu-Versorgungspfades zwischen ARU-Position und Kabelauslass und der nachfolgenden Länge der Teilnehmer-Anschlussleitung (TASL-Länge) . Für den Hauptverteiler wird isoliert betrachtet; die Kabelauslässe die direkt vom Hauptverteiler aus mit einer eigens vorgegebenen Übertragungsgüte versorgt werden, bilden den HV-Kreis. Siehe dazu auch Abschnitt 4.2.1.1.
- Bestimme eine Erweiterung des optischen Netzes um alle platzierten ARUs mit Glasfaser zu versorgen. Wir sprechen in diesem Zusammenhang von einem FTTC-Szenario und der zu erreichende Prozentsatz an Kabelauslässen wird als FTTC-Quota bezeichnet.
- Versorge einen vorgegebenen Prozentsatz potentiellen Einheiten direkt mit Glasfaser; wir sprechen von einem FTTb-Szenario bzw. einer entsprechenden FTTb-Quota.
- Versorge alle vorgegebenen B2B-Kunden- und BTS-Kunden direkt mit Glasfaser.
- Nutze die bestehende Leerrohr- und Glasfaser-Infrastruktur zur Errichtung bzw. Erweiterung des Glasfasernetzes, wenn sich dies von den Kosten als vorteilhaft erweist.

#### 4.1.2 Parameter

Der NGA-Solver wird über ein Kontrollfile gesteuert; wir beschreiben nachfolgend die wesentlichen Einstellungen:

<i>Parametergruppe</i>	<i>Modell-Parameter</i>
InputFiles	Legt die Input-Files fest (Daten und Parameter)
OutputFiles	Legt die Output-Files fest (Daten und Report)
q_FTTb	Bestimmt die FTTb-Quota
q_FTTc	Bestimmt die FTTC-Quota

<code>q_Supply</code>	Definiert die Meßgröße für die Bestimmung der Übertragungsgüte für die Versorgung von Kabelauslässen über ARUs im FTTC-Szenario; unterstützt werden Versorgungsdistanz, Signal-Dämpfung und erzielte Übertragungsrate zwischen ARU und versorgtem Kabelauslass
<code>l_TASL</code>	Festlegung der TASL-Länge
<code>t_max</code>	Maximale Solver-Laufzeit in CPU-Sekunden

Die Kosten-Parameter für den Solver sind:

<i>Parameter</i>	<i>Bedeutung</i>
<code>c_Omega</code>	Verlegekosten (Tiefbaukosten) in EUR, die bei der Errichtung neuer Infrastruktur pro Landnutzungs-kategorie und Laufmeter anfallen
<code>c_Act</code>	Aktivierungskosten pro Laufmeter für bestehende Infrastruktur; Kosten, die für die Nutzung pro existierender Faser und pro existierendem Leerrohr pro Meter anfallen.
<code>c_ARU_install</code>	Kosten für bauliche Maßnahmen bei der Errichtung eines ARU auf einem Knoten mit keiner Infrastruktur
<code>c_ARU_infrastructure</code>	Kosten für bauliche Maßnahmen bei der Errichtung eines ARU auf einem Knoten mit Infrastruktur; es werden je nach Infrastruktur-Typ unterschiedliche Kostensätze festgelegt

Die Hardware-Parameter für den Solver sind:

<i>Parameter</i>	<i>Bedeutung</i>
<code>I_ARU</code>	Typen von ARUs; je Typ sind gegeben: Bezeichner, Anzahl an Input- und Outputports, Stückkosten, Auflistung der Knoten-Infrastrukturen, auf denen der Typ errichtet werden darf
<code>I_SPlt</code>	Typen von optischen Splittern; je Typ sind gegeben: Bezeichner, Anzahl an Input- und Outputports, Stückkosten
<code>I_Mf1</code>	Typen von Glasfasermuffen; je Typ sind gegeben: Bezeichner, Anzahl an Input- und Outputports, Stückkosten
<code>I_Duct</code>	Typen von Einhüllrohren (für Glasfaserkabel, Duct); je Typ sind gegeben: Bezeichner, Anzahl der Kabel für die der Typ geeignet ist, Kabelart für die der Duct geeignet ist, Festlegung ob der Duct für die Einbringung in ein Leerrohr geeignet ist oder direkt in einen Grabungskünette eingebracht wird, benötigte Restrohrbreite im Millimeter für die Einbringung in einem Leerrohr, Stückkosten
<code>I_Cb1</code>	Typen von Glasfaserkabeln; je Typ sind gegeben: Bezeichner, Anzahl der Fasern, Kabelart (Mini- oder Micro-Kabel), maximale durchgängige Verlegelänge, Stückkosten
<code>f_BTS</code>	Anzahl der Versorgungsfasern pro BTS
<code>f_B2B</code>	Anzahl der Versorgungsfasern pro B2B-Kunden

### 4.1.3 Workflow

Der NGA-Solver besteht aus den folgenden Sub-Modellen:

- ARU-Positionierungsmodell. Berechnet die Anzahl an ARUs sowie deren Standorte, so dass eine entsprechende FTTC-Quota zur vorgegebenen Versorgungsgüte erreicht wird.

- Trassierungsmodell und Hardwaremodell Errechnet einerseits die Trassierung zur Versorgung von gegebenen ARU-Standorten, B2B-Kunden- und BTS-Standorten und andererseits die physikalischen Struktur (Glasfaserkabel und optische Komponenten) zur Versorgung der Anschlussobjekte (ARUs, B2B-Kunden, BTS) auf Basis einer gegebenen Trassierung.

Die beiden Sub-Modelle werden sukzessive in iterativer Abfolge solange betrieben ein Abbruchkriterium erreicht wird. Dies sind optional:

- Solver arbeitet bis zu einem vorgegebenen Zeitlimit.
- Solver bricht vor vorgegebenem Zeitlimit ab, wenn er erkennt, dass keine Ergebnisverbesserung mehr möglich ist; ansonsten arbeitet er bis zum entsprechenden Limit.

Die Abbildung 28 zeigt den Workflow des NGA-Solver.

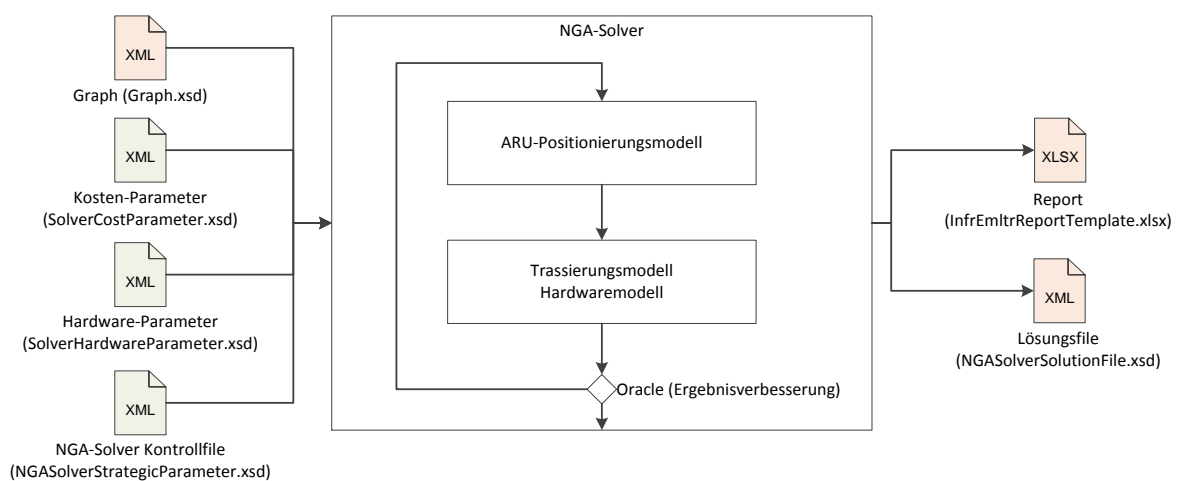


Abbildung 28. Workflow des NGA-Solver.

## 4.2 Sub-Modelle

### 4.2.1 Das ARU-Positionierungsmodell.

#### 4.2.1.1 Zuordnung von Kabelauslässen zu ARUs

Wir betrachten einen Netzwerkgraphen mit Kabelauslässen und nehmen an dass jeder Kabelauslass durch einen eindeutig beschriebenen Cu-Versorgungspfad (durchgängiger Pfad von Cu-Kabeln bis zum Hauptverteiler-Standort) versorgt wird – vergleiche Abschnitt 3.1.5.4. Man beachte, dass jedes Cu-Versorgungskabel eindeutig einer Kante des Graphen zugewiesen ist. Daraus folgt ein (topologischer) Versorgungspfad (Versorgungstrassierung) für jeden Kabelauslass.

Für einen Kabelauslass bezeichnen wir alle jene Knoten, die inzident zu einer Kante der Versorgungstrassierung sind als mögliche ARU-Position zur Versorgung des Kabelauslass. Die Gesamtmenge der möglichen ARU-Positionen ist die Menge der möglichen ARU-Positionen über alle Kabelauslässe. Siehe Abbildung 29 für eine schematische Darstellung.

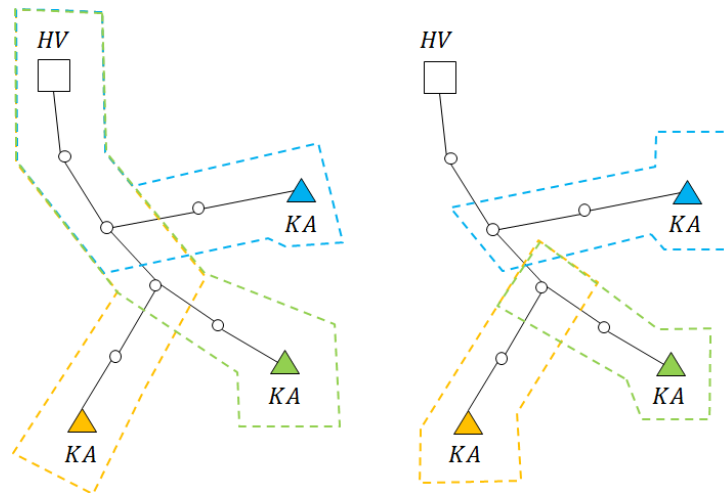


Abbildung 29. Schematisch Darstellung von möglichen- und zulässigen ARU-Positionen. Wir betrachten drei Kabelauslässe und ihre Versorgungsstrassierungen ausgehend vom HV. Die zu den Trassenkanten inzidenten Knoten sind durch die Kreise dargestellt. In der linken Abbildung sind für die farblich codierten Kabelauslässe die jeweils möglichen ARU-Positionen entsprechend eingerahmt. Wir nehmen an dass jede Kante die Euklidische Länge Eins hat und legen als Maß für die Übertragungsgüte die Maximaldistanz von Zwei an; daraus resultieren die zulässigen ARU-Positionen wie im rechten Bild dargestellt.

Aus den möglichen ARU-Positionen eines Kabelauslasses werden auf Basis einer geforderten Übertragungsgüte zulässigen ARU-Positionen ausgewählt. Es werden dabei drei Optionen, die wir als Maß der Übertragungsgüte bezeichnen, unterstützt:

- Maximaldistanz zwischen einer ARU-Position und einem Kabelauslass. Darunter verstehend wir eine maximale (Euklidische) Länge ausgehend vom Kabelauslass entlang der Versorgungsstrassierung.
- Maximaldämpfung ausgehend von einer ARU-Position bis zu einem Kabelauslass. Auf Basis der (Euklidischen) Länge zwischen dem Kabelauslass und einer möglichen ARU-Position sowie unter Berücksichtigung der Adern-Querschnitte der auf diesem Teilstück installierten Cu-Versorgung wird die entsprechende Signal-Dämpfung berechnet; siehe dazu u.A. (Riggert, Martin, & Lutz, 2014), (Ford & Lew, 1998) (NN, 2015).
- Mindestdatenrate für die Signal-Übertragung von einer ARU-Position zu einem Kabelauslass bzw. der dahinter liegenden Teilnehmeranschlusseinrichtungen. Auf Basis der bekannten Dämpfung von einer möglichen ARU-Position bis zu einem Kabelauslass bzw. der dahinterliegenden Teilnehmeranschlusseinrichtungen (Cu-Länge und Cu-Querschnitt wird durch Parameter festgelegt) sowie der Annahme von übertragungstechnischen Parametern wird die entsprechende Daten-Übertragungsrate berechnet; siehe dazu u. A. (Riggert, Martin, & Lutz, 2014), (Ford & Lew, 1998) (NN, 2015).

Sowohl Dämpfungs- als auch Bitratenberechnung sind in einem Modell zusammengefaßt; wir bezeichnen dieses als Bitratenmodell.

Damit lässt sich für jeden Kabelauslass eine Menge von zulässigen ARU-Positionen errechnen. Die Gesamtmenge der zulässigen ARU-Positionen ist wiederum die Menge der zulässigen Positionen aller im Graphen enthaltenen Kabelauslässe. Siehe wiederum Abbildung 29 für eine schematische Darstellung von zulässigen ARU-Positionen.

#### 4.2.1.2 Auswahl von ARU-Standorten und FTTC-versorgten Kabelauslässen.

Die Bestimmung einer Kosten-optimalen Teilmenge von zulässigen ARU-Positionen aus der Gesamtmenge der zulässigen ARU-Positionen führt zu einer Liste von ARU-KA Zuweisungen. Die Summe der potentiellen Einheiten über alle derart gelisteten FTTC-versorgten Kabelauslässe, muß der geforderten FTTC-Quota genügen. Weiters ist das Prinzip der Kabeldisjunktheit zu beachten: der Cu-Versorgungspfad (i.e. die Menge der Cu-Versorgungskabel) von zwei Kabelauslässen, die von unterschiedlichen ARU-Positionen aus versorgt werden, muß disjunkt sein. Die Kosten einer ARU-Position wird über die Anlaufkosten (Trassierungskosten bis zum Hauptverteiler-Standort, Kosten für bauliche Maßnahmen für die ARU-Errichtung) bestimmt. Siehe Abbildung 30 für ein entsprechendes Beispiel.

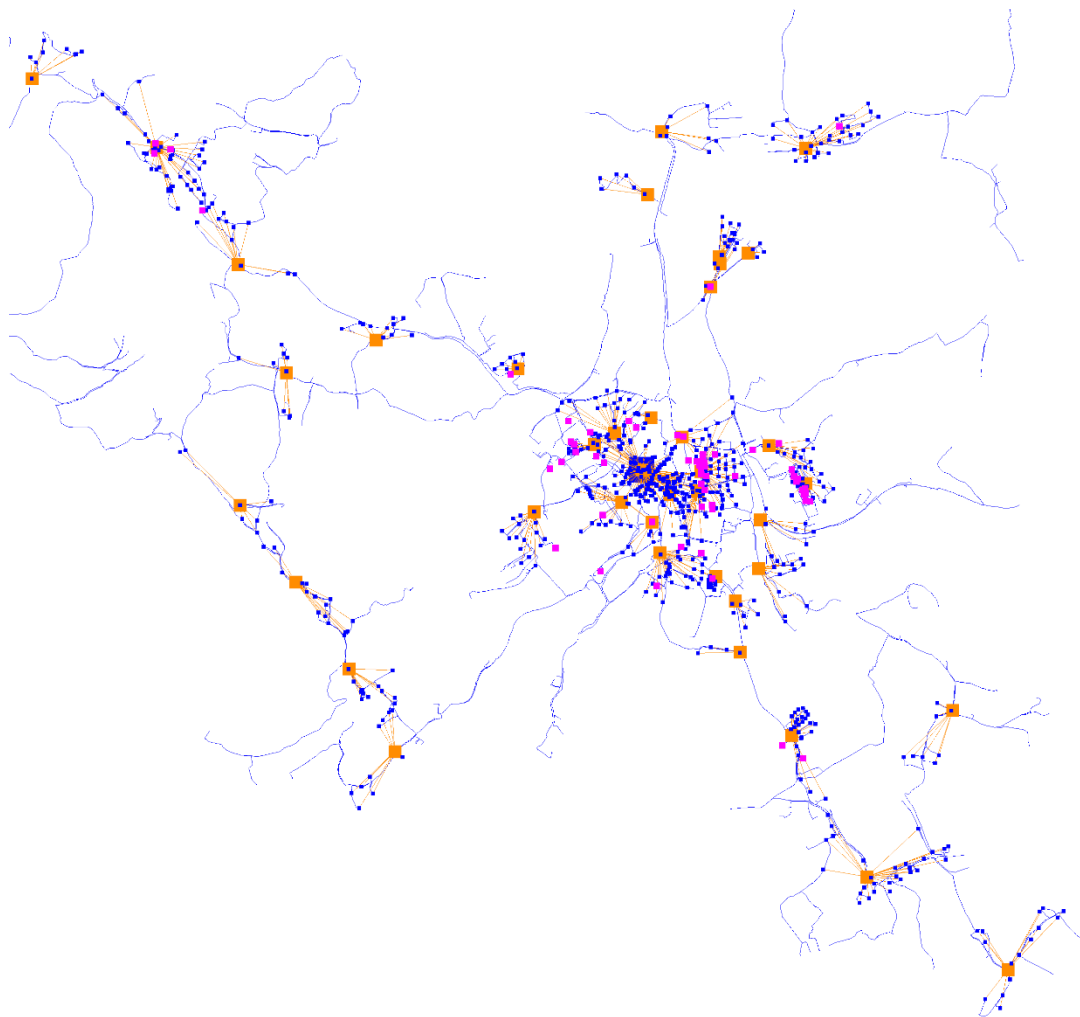


Abbildung 30. Anschlussbereich 04267-02 (Feldkirchen/Kärnten). Auswahl von ARU-Positionen (orange Quadrate) mit entsprechenden Zuweisungen von Kabelauslässen (symbolisiert durch die ausgehenden orangefarbenen Strahlen.) derart, dass eine FTTC-Quota von 60% erreicht wird. Das Cu-Netzwerk ist in blau dargestellt, die Knoten mit Kabelauslässen sind als blaue Quadrate dargestellt. Zusätzlich betrachtet wurde eine 20% FTTB-Quota – die Kabelauslässe (bzw. deren Positionen) die direkt mit Glasfaser versorgt werden sind durch die Magenta-farbigen Quadrate gekennzeichnet.

#### 4.2.1.3 Auswahl von FTTB-versorgten Kabelauslässen

Die Auswahl von FTTB-versorgten Kabelauslässen, derart dass die Summe der entsprechend zugeordneten potentiellen Einheiten eine geforderte FTTB-Quota erfüllt, erfolgt synergetisch zur

Bestimmung der ARU-Positionen. Nachdem ARU-Positionen ohnehin mit Glasfaser zu versorgen sind, ist eine „hinreichende Nähe“ von FTTb-Anschlussobjekten zu diesen Positionen im Sinne der Kostenminimierung als vorteilhaft zu erwarten.

#### 4.2.2 Das Trassierungs-und Hardwaremodell

Es gilt die folgenden Kosten zu minimieren:

- Verlegekosten. Diese Kosten fallen auf einer Kante an, wenn diese in die Trassierung aufgenommen wird und (neben der Nutzung von Leerrohren oder existierenden freien Fasern) zusätzliche Netzwerkkomponenten installiert werden. Die Kosten werden durch die Kantenkosten in Analogie zu Abschnitt 3.1.4.1 bestimmt.
- Aktivierungskosten. Diese Kosten fallen auf einer Kante an, wenn diese in die Trassierung aufgenommen wird und Leerrohre oder existierende freie Fasern genutzt werden. Die Kosten werden pro Laufmeter und genutzter Komponente summiert.
- Komponentenkosten. Diese ergeben sich aus der Summe der Stückkosten aller in der errechneten physikalischen Struktur enthaltenen Komponenten (Glasfaserkabel, Ducts, ARUs, Glasfasermuffen und optischen Splittern).

Dabei sind die folgenden Nebenbedingungen zu beachten:

- ARUs bestimmter Typen dürfen nur auf Knoten mit bestimmten Infrastrukturen errichtet werden.
- ARUs werden nur auf den gegebenen ARU-Positionen installiert. Pro ARU-Position ist nur eine vorgegebene Maximalanzahl an ARUs zulässig.
- Die Kanten, auf denen physikalische Komponenten installiert bzw. bereits existierende Komponenten genutzt werden (versorgende Kanten) bilden einen kreisfreien- und zusammenhängenden Teilgraphen, der insbesondere alle ARU-Positionen, alle Knoten mit zugewiesenen B2B-Kunden und BTS sowie alle Knoten mit FTTb-versorgten Kabelauslässen enthält.
- Jede ARU-Position ist derart mit ARUs zu bestücken, dass die Summe der Cu-Outputports mindestens gleich groß ist, wie die Summe der potentiellen Einheiten über alle Kabelauslässe, die von dieser Position aus versorgt werden.
- Jeder Knoten mit FTTb-versorgten Kabelauslässen ist derart mit optischen Splittern zu bestücken, dass die Summe der Glasfaser-Outputports mindestens gleich groß ist, wie die Summe der potentiellen Einheiten über alle entsprechenden Kabelauslässe.
- Alle versorgenden Kanten müssen mindestens so viele Fasern besitzen, so dass der Bedarf an Fasern für alle über die Kante versorgten Objekte (ARUs, FTTb-versorgte Kabelauslässe, B2B-Kunden und BTS) gedeckt ist. Der Bedarf wird über die Summe der Inputports von ARUs und optischen Splittern bzw. den für B2B- und BTS-Objekten definierten Parametern (siehe Abschnitt 4.1.2) bestimmt.
- Mini- bzw. Mikrokabel dürfen nur in Mini- bzw. Mikro-Ducts geführt werden. Die entlang einer Kante installierten Mini- und Mikro-Ducts müssen derart dimensioniert sein, dass alle entlang dieser Kante geführten Mini- und Micro-Kabel gefasst werden.
- Mini- und Mikro-Ducts können nur in existierenden Leerrohre eingebracht werden, wenn deren Restrohrdurchmesser ausreichend für die entsprechende Summe der Außendurchmesser der Ducts ist.

- Für Kanten auf denen Ducts installiert werden, deren Gesamtdurchmesser größer ist als die Summe der Restrohrdurchmesser aller existierenden Leerrohre, muss zusätzlich neu verlegt werden.
- Die Anzahl der auf einer Kante aktivierten Fasern ist stets kleiner als die Anzahl der existierenden Fasern.
- Die Summe der (aus Upstream-Richtung) in einen Knoten eingehenden Fasern ist stets größer oder gleich als die Summe aller (in Downstream-Richtung) aus den Knoten ausgehenden Fasern.
- Wenn die Anzahl der Kabel eines Typs, die (aus Upstream-Richtung) in einen Knoten eingehen, nicht gleich der Anzahl der Kabel dieses Typs ist, die (in Downstream-Richtung) den Knoten wieder verlassen, dann ist eine optische (Abzweig-) Muffe zu berücksichtigen.
- Wenn ein Kabelzug (durchgängig verlegtes Kabel) länger ist als die maximale durchgängige Verlegelänge des entsprechenden Kabeltyps, so ist eine optische (Verbindungs-) Muffe zu berücksichtigen. Beachte zu diesem und dem obigen Punkt: das Modell unterscheidet nicht explizit zwischen optischen Abzweig- und Verbindungsmuffen.

Dieses Modell wird als Ganzzahlig-Lineares-Programm formuliert und mit einem Approximations-Solver gelöst; für Details verweisen wir auf (Bachhiesl, 2005) und (Bachhiesl, 2006) bzw. auf (Nemhauser & Wolsey, 1999).

Die Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen ein exemplarisches Ergebnis.

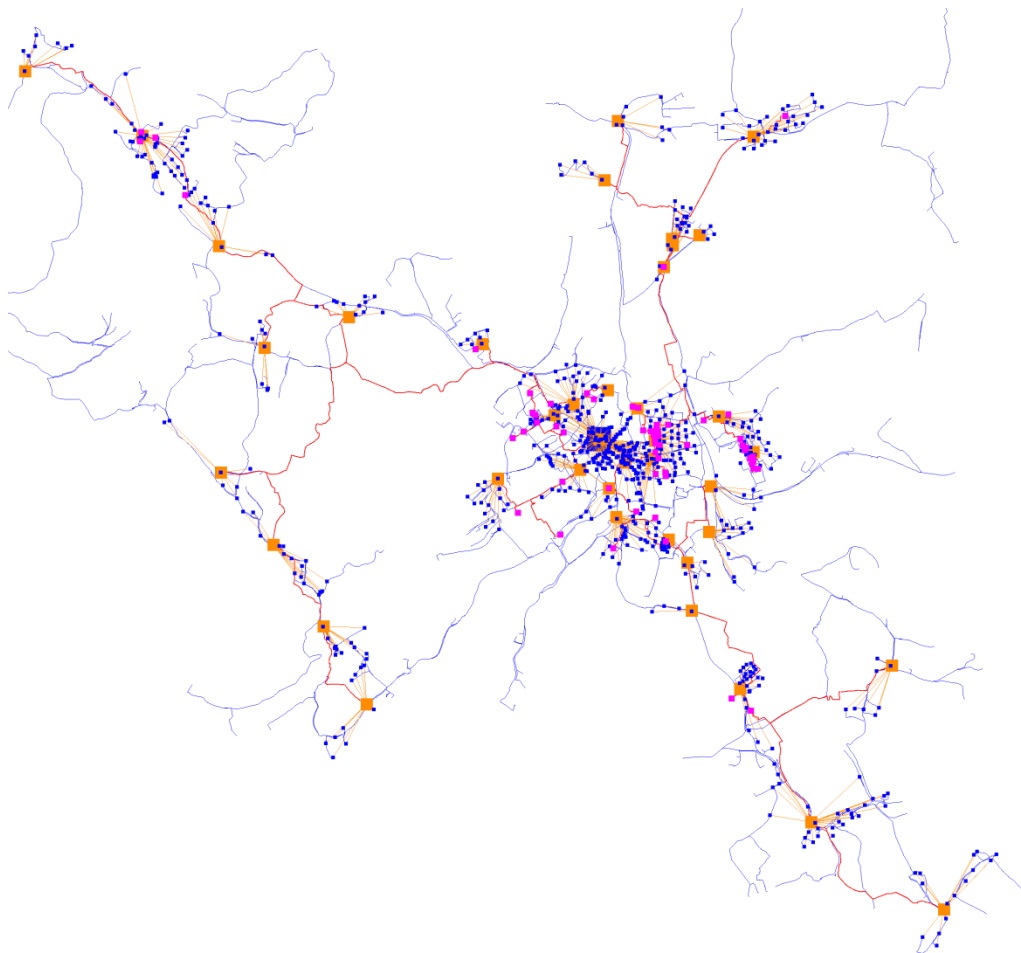


Abbildung 31. Ergebnis des Trassierungsmodells gemäß Abbildung 30. Neue Verlegestrecken und Abschnitte, in entlang denen bereits existierende Infrastruktur aktiviert wurde (vergleiche Abbildung 26), sind als orange Linien dargestellt.

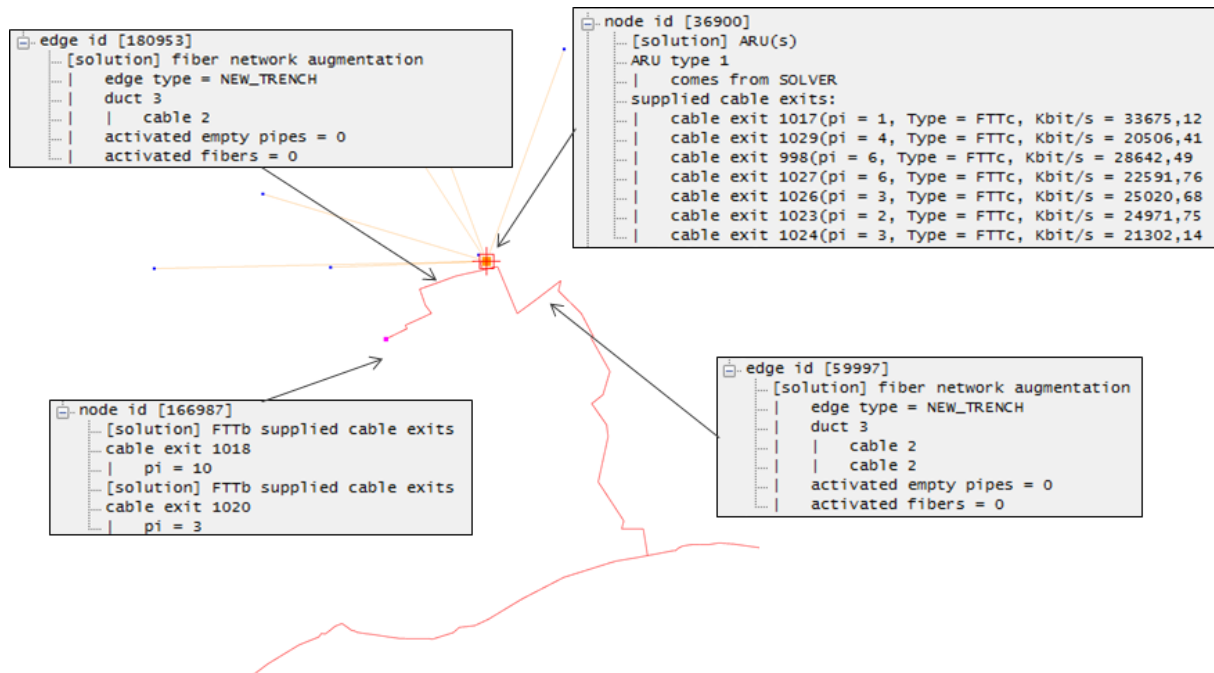


Abbildung 32. Ergebnis des Hardwaremodells auf einem gezoomten Bereich der Abbildung 30. Am Knoten 166987 befinden sich zwei FTTb-versorgte Kabelauslässe – diese werden bis zum Knoten 180953 über eine Glasfaserkabel vom Typ 2, das wiederum in einem neu verlegten Duct vom Typ 3 installiert wurde, versorgt. Am Knoten 180953 befindet sich ein ARU der 7 Kabelauslässe FTTC-versorgt. Von diesem Knoten führen nunmehr zwei Kabel vom Typ 2, wiederum in einem neu-verlegten Duct vom Typ 3, weiter in Upstream-Richtung.

## 5 Output-Daten – Reportfiles

### 5.1 Allgemeines zum Reporting

Die Module Cu-Generator, Leerrohr-Generator, Fiber-Generator und NGA-Solver unterstützen die Generierung von Reportfiles. Diese beinhalten die wesentlichen Inputdaten, Parameter, Modellergebnisse bzw. daraus abgeleitete Größen.

Bei der Parametrierung und dem Reporting von Kosten wird zwischen Solver- und Reportkosten unterschieden. Solverkosten sind die Kostenfaktoren, die von den Modellen in der Lösungsfindung berücksichtigt werden. Mit Hilfe dieser Parameter lassen sich daher User-Präferenzen abbilden, die unter Umständen zu einer nicht validen Kostenbewertung des Ergebnisses führen. Daher betrachten wir parallel dazu Reportingkosten, die eine zusätzliche, den realen Gegebenheiten angepasste, Kostenbewertung der Modellergebnisse ermöglicht.

### 5.2 Cu-Generator-Report

#### 5.2.1 Input-Daten, Netzwerkgraph

In dieser Sektion werden die wesentlichen Charakteristika des zugrundeliegenden Netzwerkgraphen beschrieben; vergleiche Abschnitt 2.1.



Nachfolgend zeigen wir ein Beispiel und geben eine entsprechende Interpretation (sofern die Einträge nicht selbst-erklärend sind):

Inputdaten		
Typ	Wert	Einheit
Anzahl Knoten im Netzwerkgraphen:	180.622	
Anzahl Kanten im Netzwerkgraphen:	246.728	
ASB-Ausdehnung:	134,22	km <sup>2</sup>
Anzahl der Kabelauslässe:	1.334	
Gesamtsumme der potentiellen Einheiten:	6.322	

Die ASB-Ausdehnung entspricht der Fläche des Rechteckes das durch die Knoten mit der kleinsten und größten x- bzw. kleinsten und größten y-Koordinate beschrieben wird.

## 5.2.2 Pre-Processing

Diese Sektion beschreibt die Ergebnisse der Pre-Processing Modell in der Reihenfolge wie Sie in die entsprechende Queue eingebracht wurden; vergleiche Abschnitt 3.1.2.

Nachfolgend zeigen wir ein Beispiel und geben eine entsprechende Interpretation (sofern die Einträge nicht selbst-erklärend sind):

Preprocessing						
Die nachfolgende Tabelle beinhaltet den sukzessiven Ablauf von Pre-Processing-Modellen und deren Ergebnissen.						
[1] Anzahl an Kabelauslässen			[3] Anzahl der Positionen (Knoten im Graphen) mit Kabelauslässen			
[2] Summe der potentiellen Einheiten über alle Kabelauslässe			[4] durchschnittliche Projektionsdistanz in Meter			
Modell	Parameter	Wert	[1]	[2]	[3]	[4]
CuGeneratorTools.ModifyPE	ReductionFactorPE	70,00				
	ReductionPEStrategy	Equalized	1.081	4.426	1.080	
CuGeneratorTools.MergeConnObj	GraphDist	false				
	MaxDist	100				
	MaxDemand	200	498	4.426	498	
CuGeneratorTools.ProjectConnObj	ProjectTo	Strassenanlage	498	4.426	498	13,08

Im oben stehenden Beispiel wurde die Gesamtsumme der potentiellen Einheiten von 6322 auf 70%, i.e. 4426, reduziert; nachdem das Modell `ModifyPE` mit der Reduktionstrategie `Equalized` betrieben wurde hat sich dabei die Anzahl der Kabelauslässe von ursprünglich 1334 auf 1081 verringert. Danach wurden alle Auslässe, deren Euklidische Distanz weniger als 100 Meter beträgt zu einem Kabelauslass zusammengefaßt, wobei diese nicht mehr als 200 potentielle Einheiten besitzen dürfen. Dies reduziert die Anzahl der Kabelauslässe auf 498. Diese 498 Kabelauslässe wurden danach auf die Nutzungsklasse „Straßenanlage“ projiziert. Die durchschnittliche Projektionslänge beträgt ca. 13 Meter.

## 5.2.3 Cluster-Modell

Diese Sektion beschreibt die Ergebnisse des Cluster-Modells gemäß Abschnitt 3.1.3.

Nachfolgend zeigen wir ein Beispiel und geben eine entsprechende Interpretation (sofern die Einträge nicht selbst-erklärend sind):

**Clustermodell**

Definition - Distanz: kürzester Weg im Netzwerkgraphen:   
 Euklidische Punkt-zu-Punkt-Distanz:

Clustering-Parameter: [1] maximale Distanz in Meter zwischen Versorgungszentrum und Anschlussobjekt in einem Sub-Netz der Netzebene  
 [2] maximale Summe der potentiellen Einheiten [2] in einem Sub-Netz der Netzebene

Netzebene	[1]	[2]	Versorgungslängenoptimierung = <input type="text" value="ja"/>
HVKreis	300,00	-	
End-Verteilkabelnetz	1.500,00	500	
Zwischen-Verteilkabelnetz	4.000,00	1.000.000	

Modellergebnis:

- [1] maximale Distanz zum Versorgungszentrum für alle Anschlussobjekte in allen Sub-Netzen der Netzebene in Meter
- [2] durchschnittliche Distanz zum Versorgungszentrum für alle Anschlussobjekte in allen Sub-Netzen der Netzebene in Meter
- [3] maximale Summe der potentiellen Einheiten in einem Sub-Netz der Netzebene
- [4] durchschnittliche Summe der potentiellen Einheiten der Sub-Netze der Netzebene
- [5] maximale Anzahl der Positionen (Knoten im Graph) mit Anschlussobjekten in einem Sub-Netz der Netzebene
- [6] durchschnittliche Anzahl der Positionen (Knoten im Graph) mit Anschlussobjektender Sub-Netze der Netzebene

Netzebene	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
HVKreis	298,03	191,06	488	488	19	19
End-Verteilkabelnetz	2.424,92	747,64	500	164	40	20
Zwischen-Verteilkabelnetz	2.997,62	1.154,22	3.046	984	14	6
Amtskabelnetz	4.124,15	2.114,53	3.938	3.938	5	5

Modellparametrierung: die Distanz im Modell ist die Euklidische Punkt-zu-Punkt-Distanz. Der HV-Kreis wird durch Terminalknoten definiert, die nicht weiter als 300 Meter vom Hauptverteiler-Standort entfernt sind. Ein End-Verteilkabelnetz hat eine maximale Ausdehnung von 1500 Meter und in Summe maximal 500 potentielle Einheiten; entsprechend die Dimensionierung von Zwischen-Verteilkabelnetzen. Die Versorgungslängen-Optimierung gemäß Abschnitt 3.1.3.3 ist aktiviert.

Die Modellergebnisse sind gemäß der nachfolgenden Tabelle gegeben. Man beachte dass die maximal erlaubte Ausdehnung von End-Verteilnetzinstanzen (aufgrund der Versorgungslängen-Optimierung) verletzt wird.

**5.2.4 Trassierungs-Modell**

Diese Sektion beschreibt die Ergebnisse des Trassierungs-Modells gemäß Abschnitt 3.1.4.

Nachfolgend zeigen wir ein Beispiel und geben einen entsprechende Interpretation (sofern die Einträge nicht selbst-erklärend sind):

**Routingmodell**

Allgemeine Modellparameter:

Nullkosten räumliche Überdeckung:  Wegerrecht-Faktor:   
 Steiner-Solver:

Landnutzungen:

- [1] Verlegekosten pro Meter (Solver)
- [2] Verlegekosten pro Meter
- [3] Gesamtverlegelänge in Meter
- [4] Kosten pro Landnutzung in Euro

Landnutzungs-kategorie	[1]	[2]	[3]	[4]
Gebaeude	320,00	12,00	589,26	7.071,12
Bauflaeche_befestigt	170,00	170,00	1.224,07	208.091,90
Bauflaeche_begruent	55,00	55,00	75.469,38	4.150.815,90
Landwirtschaftlich_genutzte_Grundfla	58,00	58,00	18.273,85	1.059.883,30
Acker	70,00	50,00	40.331,82	2.016.591,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Projektion	60,00	0,00	4.469,05	0,00
Unbekannt	2.000,00	200,00	342,14	68.428,00
Summe Verlegekosten:				18.691.993,08

[1] maximale Distanz zum Versorgungszentrum für alle Anschlussobjekte in allen Sub-Netzen der Netzebene in Meter  
 [2] durchschnittliche Distanz zum Versorgungszentrum für alle Anschlussobjekte in allen Sub-Netzen der Netzebene in Meter

Netzebene	[1]	[2]
HVKreis	823,55	410,60
End-Verteilkabelnetz	3.243,60	1.308,65
Zwischen-Verteilkabelnetz	4.532,83	1.793,82
Amtskabelnetz	4.435,29	2.744,50

Modellparameter: die Nutzung von Synergie-Potentialen im Bereich der Trassierungskosten wurde aktiviert. Für Landnutzungen die auf definierten Kanten ein Wegerecht besitzen, fallen nur die halben spezifischen Verlegekosten an; die spezifischen Verlegekosten pro Landnutzung sind in der nachfolgenden Tabelle beschrieben.

Modellergebnis: Insgesamt belaufen sich die Verlegkosten (Reporting-Kosten) auf ca. 4,3 Mio EUR. Auf Basis der errechneten Trassierung lassen sich nunmehr auch die konkreten Versorgungslängen angeben. Dies erfolgt in der nachfolgenden Tabelle. Eine detaillierte Untersuchung der Versorgungslängen erfolgt über die nachfolgenden Histogramme und Verteilfunktionen:

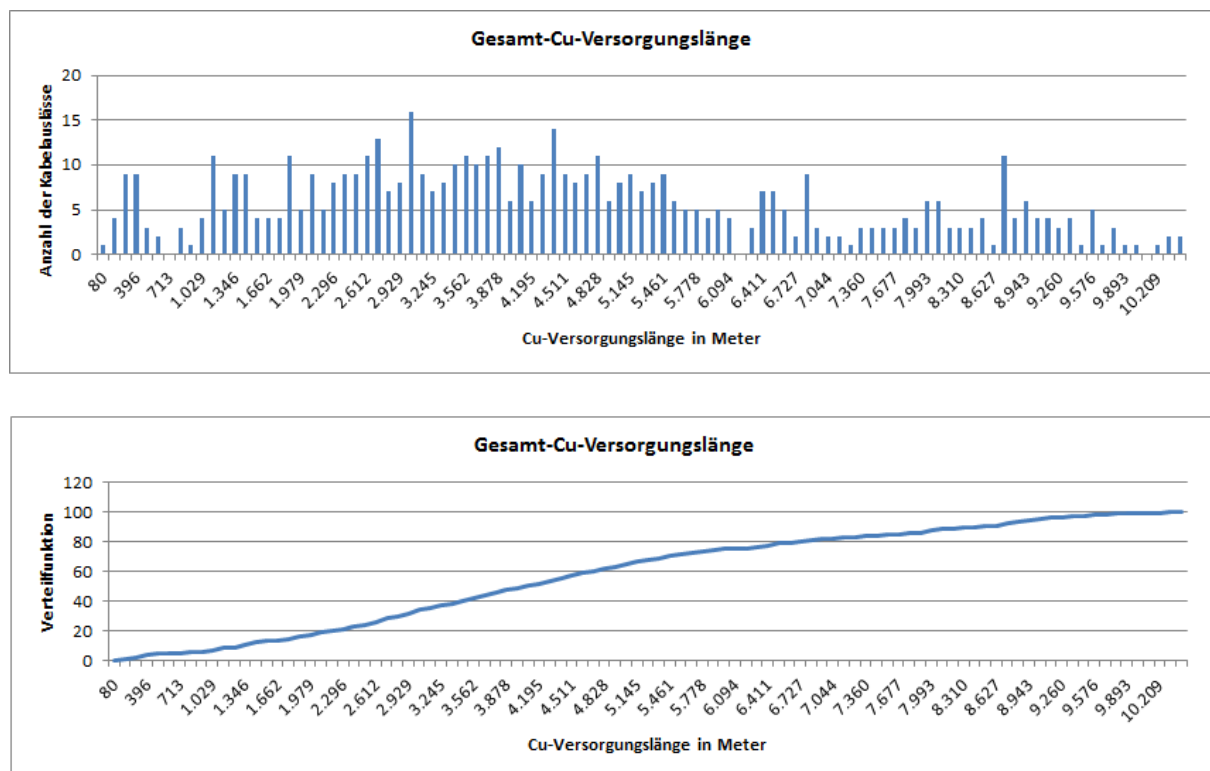


Abbildung 33. Histogramm und Verteilung der Gesamtversorgungslänge über alle Netzwerkhierarchien aller Kabelausslässe.

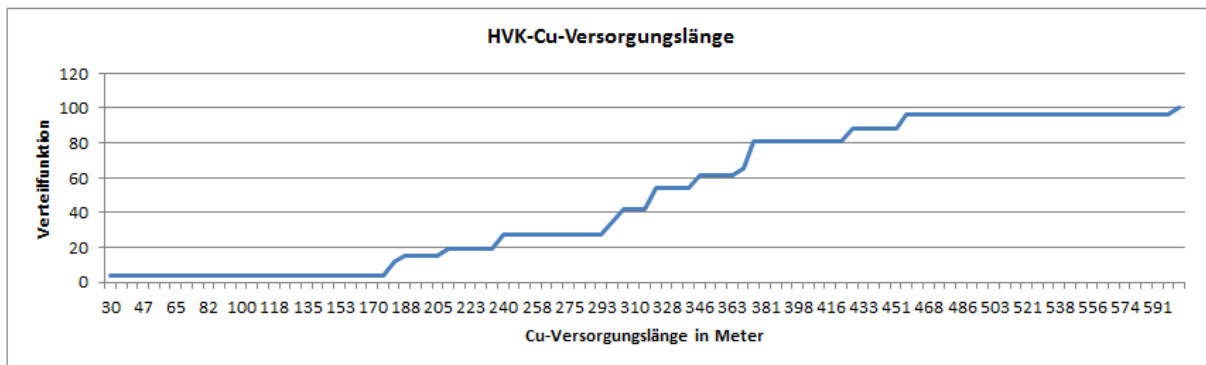
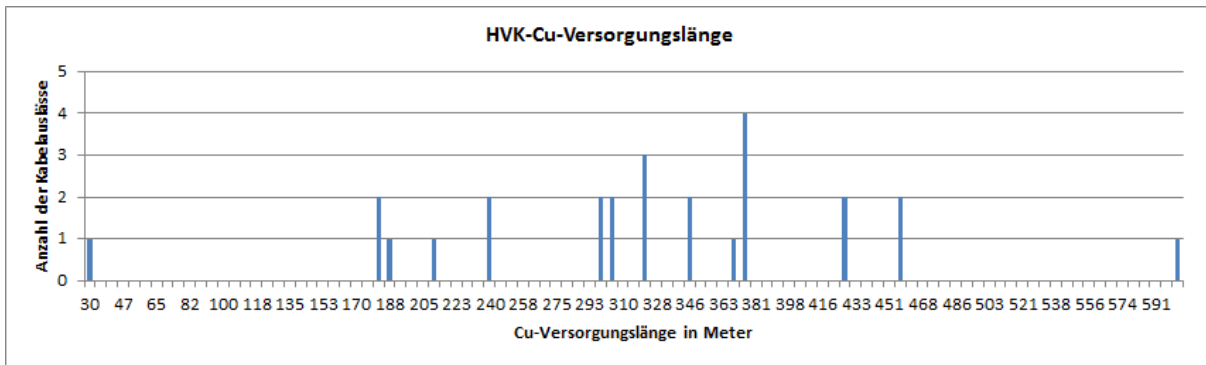


Abbildung 34. Histogramm und Verteilung der Versorgungslänge im HV-Kreis.

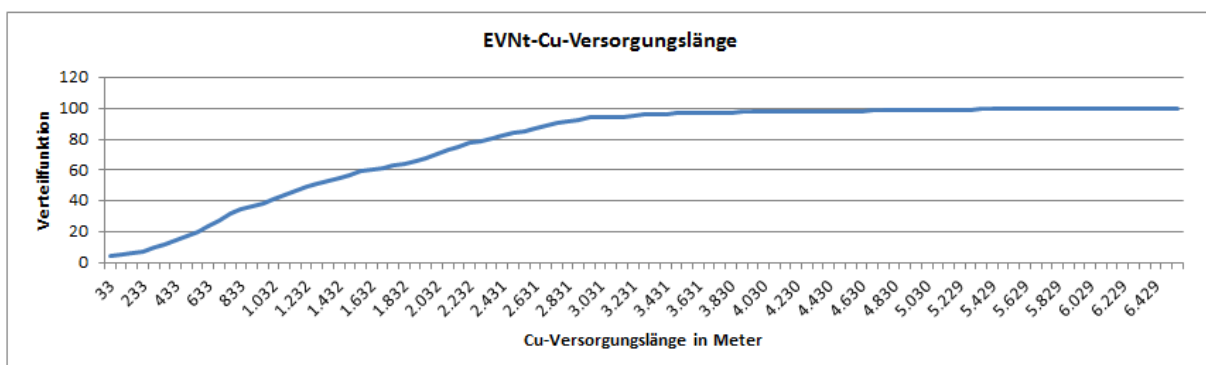
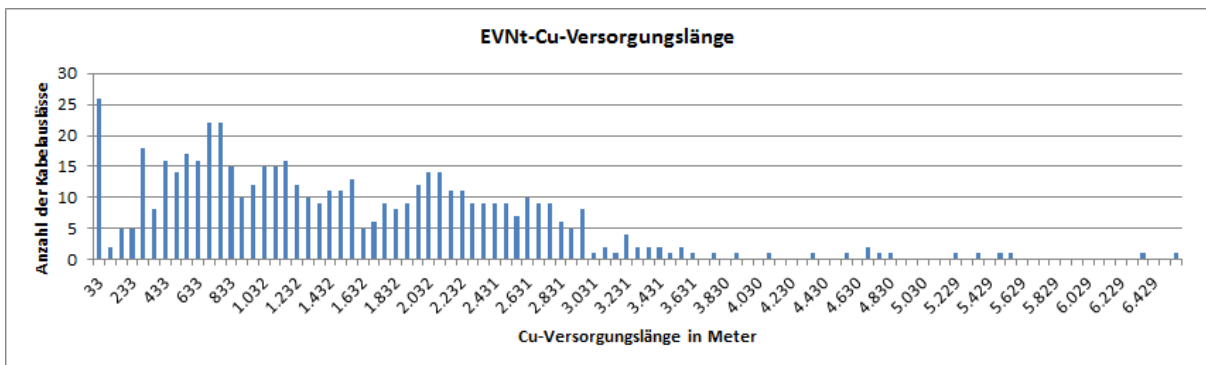


Abbildung 35. Histogramm und Verteilung der Versorgungslänge über alle Instanzen der End-Verteilkabelebene.

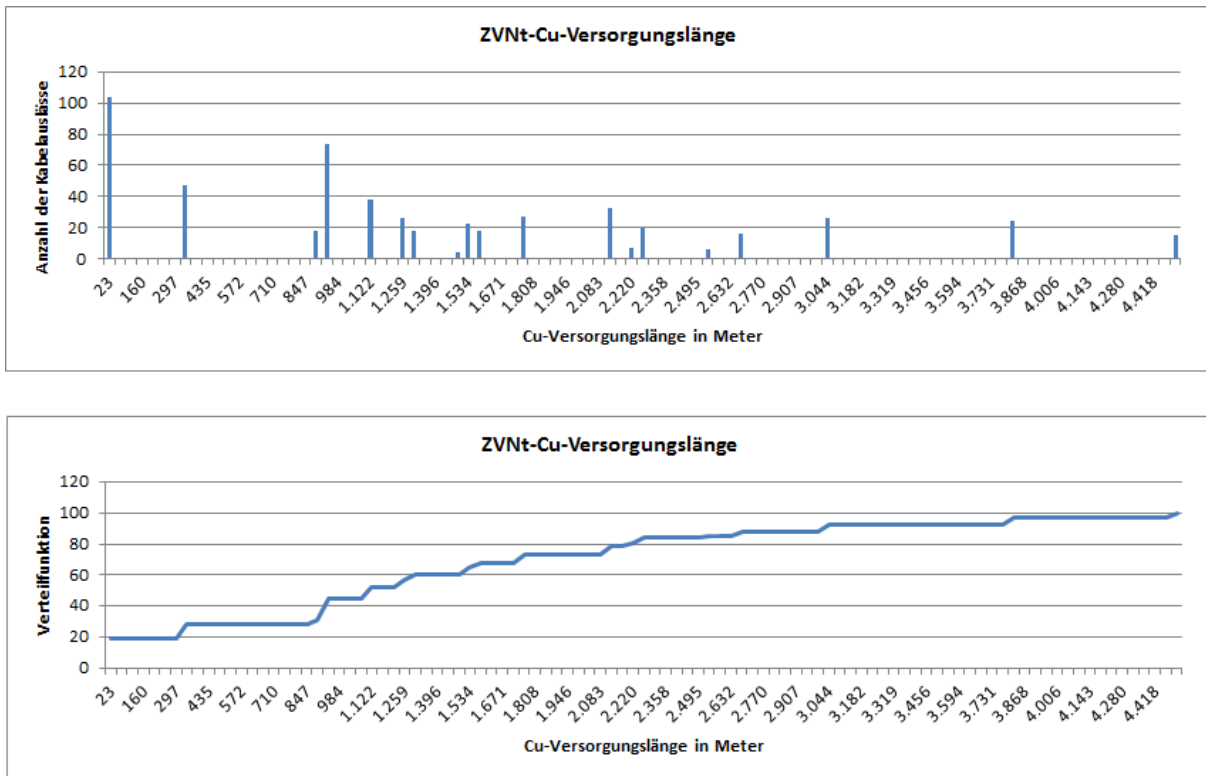


Abbildung 36. Histogramm und Verteilung der Versorgungslänge über alle Instanzen der Zwischen-Verteilkabelebene.

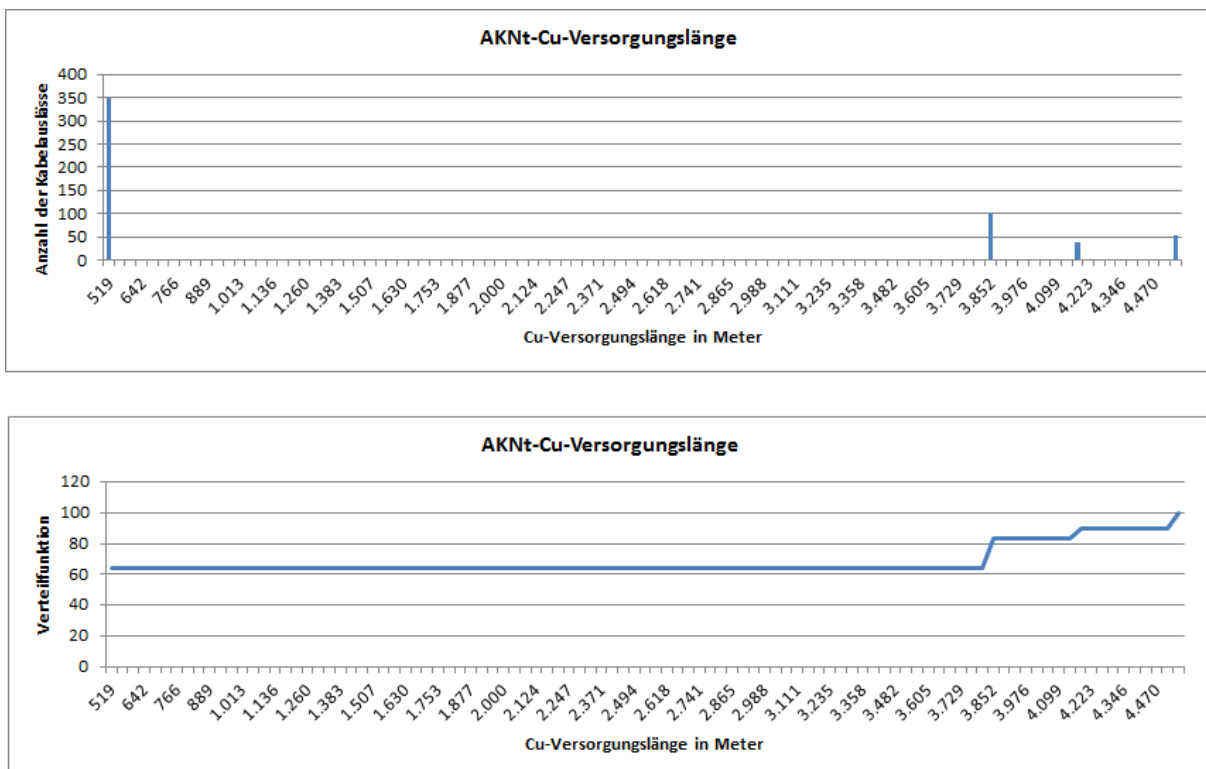


Abbildung 37. Histogramm und Verteilung der Versorgungslänge im Amtskabelnetz.

### 5.2.5 Hardware-Modell

Diese Sektion beschreibt die Ergebnisse des Hardware-Modells gemäß Abschnitt 3.1.5.

Nachfolgend zeigen wir ein Beispiel und geben eine entsprechende Interpretation (sofern die Einträge nicht selbst-erklärend sind):

#### Hardwaremodell

Allgemeine Modellparameter:

Standard-Künettenbreite in Meter:	0,40
Maximale Künettenbreite in Meter:	2,00
Penalty für Überschreitung der Standard-Künettenbreite in EUR pro Meter:	50,00
Maximale Anzahl an Kabel, die zur Versorgung eines Knotens erlaubt sind:	10
Maximale Anzahl an Komponenten pro Knoten:	5

Cu-Kabel:

[1] Anzahl der Cu-Doppeladern	[2] Cu-Querschnitt einer Ader in Millimeter
[3] benötigte Künettenbreite in Meter	[4] maximale durchgängige Verlegelänge
[5] Kosten in EUR pro Meter (Solver)	[6] Kosten in EUR pro Meter
[7] Verlegelänge	[8] Verlegekosten in EUR

Id	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
1	10,00	0,40	0,10	500,00	0,40	0,40	192.045,85	76.818,34
2	50,00	0,40	0,10	500,00	1,00	1,60	56.233,67	89.973,88
3	180,00	0,40	0,10	500,00	2,00	7,30	49.797,08	363.518,67
4	680,00	0,40	0,10	500,00	5,00	20,90	6.576,24	137.443,36
5	1.800,00	0,40	0,10	500,00	10,00	66,50	2.057,36	136.814,48
Summe Kabelkosten:								804.568,72

Cu-Komponenten:

[1] Anzahl Input-Ports	[2] Anzahl Output-Ports	[3] Typ der Komponente
[4] maximale Anzahl pro Knoten	[5] maximale Anzahl an Versorgungskabel	[6] Kosten pro Stück (Solver)
[7] Kosten pro Stück	[8] Anzahl der installierten Stück	[9] Kosten in EUR

Id	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
1	10	10	VM	5	10	600,00	600,00	0	0,00
2	50	50	VM	5	10	1.000,00	1.000,00	0	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	680	680	AM	5	5	40,00	2.200,00	58	127.600,00
10	1.800	1.800	AM	5	5	100,00	4.000,00	6	24.000,00
11	10	10	KA	5	1	600,00	600,00	516	309.600,00
12	50	50	KA	5	1	1.000,00	1.000,00	50	50.000,00
13	180	180	KA	5	1	1.500,00	1.500,00	2	3.000,00
14	680	680	KA	5	1	2.000,00	2.000,00	0	0,00
15	1.800	1.800	KA	5	1	3.600,00	3.600,00	0	0,00
16	10	10	KV	5	5	1.600,00	1.600,00	0	0,00
17	50	50	KV	5	5	10.000,00	10.000,00	4	40.000,00
18	180	180	KV	5	5	15.000,00	15.000,00	5	75.000,00
19	680	680	KV	5	5	20.000,00	20.000,00	13	260.000,00
20	1.800	1.800	KV	5	5	36.000,00	36.000,00	4	144.000,00
Summe Komponentenkosten:									1.366.700,00

Die oben stehenden Tabellen enthalten die gegebene Hardware-Parametrierung sowie die Stückzahlen der entsprechenden Komponenten. Daraus lassen sich die Hardwarekosten von ca. 2,2 Mio. EUR ableiten.

### 5.3 Leerrohr-Generator

Wir beschreiben den Report des Generators anhand des nachfolgenden Beispiels sofern die Einträge nicht selbst-erklärend sind; vergleiche dazu Abschnitt 3.2.

**Report Leerrohr-Generator**

**Inputdaten**

Kupferlänge = Summe der (Eulidischen) Länge der Kanten, mit Cu-Infrastruktur top-down bis zur entsprechenden Hierarchieebene

Kupferinfrastrukturbreite einer Kante = Summe der Adern-Querschnitte (einer bestimmten Netzebenen), die auf der Kante existieren

[1] Hauptverteilerkreis      [2] End-Verteil-Kabelnetz      [3] Zwischenverteiler-Kabelnetz      [4] Amtskabelnetz

Bemerkung: [1] entspricht der Gesamtkupferlänge des Graphen

	[1]	[2]	[3]	[4]
Kupferlänge in Meter:	250.258,92	235.636,46	40.083,88	11.637,84
durchschnittliche Kupferinfrastrukturbreite einer Kante in Millimeter:	25,92	28,03	125,09	274,86

Die oben stehende Sektion analysiert die für den Generator relevanten Input-Größen des gegebenen Cu-Netzwerks. Insbesondere das Modell `GrowFromHV` bezieht sich auf die Kupferlänge des Cu-Netzwerkes oder von Teilen desselben.

**Modelltyp und -parametrierung**

**Modell `GrowFromHV`:** Ausgehend vom HV werden solange Leerrohrkapazitäten entlang des Kupfernetzes emuliert, bis ein Prozentsatz der Kupferlänge erreicht wird; Kupfernetzabschnitte werden je nach Anzahl der der Kupfer-Doppeladern priorisiert.

<b>wurde angewandt:</b>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>ja</b>	
Parameter: $p=$	<input type="text" value="0,70"/>	0,70	Prozent/100 der Kupferlänge
$p_{Cu}=$	<input type="text" value="0,60"/>	0,60	Prozent/100 der Kupferinfrastrukturbelegung an der Gesamtrohrkapazität; es gilt: $b_{Cu} \dots \text{Kupferinfrastrukturbreite} \rightarrow \text{Leerrohrkapazität } r = b_{Cu} * (1/p_{Cu} - 1)$
$\rho_{max}=$	<input type="text" value="50,00"/>	50,00	max. Kapazität eines Standardrohres in Millimeter; Anzahl Leerrohre = $\text{Ceil}(r/\rho_{max})$
Kupfernetz bis:	<input type="text" value="ZVnt"/>	ZVnt	es wird das Kupfernetz top-down bis zur entsprechenden Kupfer-Netzebene betrachtet; bestimmt damit das betrachtete Gesamt-Kupfernetz
$\rho_{sum\_max} =$	<input type="text" value="500,00"/>	500,00	max. Kapazität aller Leerrohre pro Kante in Millimeter

**Modell `TakeNrTwinWires`:** Ausgehend vom HV werden entlang des Kupfernetzes auf jenen Kanten Leerrohrkapazitäten emuliert, die über eine Mindest-Anzahl an Cu-Doppeladern besitzen

<b>wurde angewandt:</b>	<input type="checkbox"/>	<b>nein</b>	
Parameter: $t_{min}=$	<input type="text" value=""/>		Mindestanzahl an Kupfer-Doppeladern
$p_{Cu}=$	<input type="text" value=""/>		Prozent/100 der Kupferinfrastrukturbelegung an der Gesamtrohrkapazität; es gilt: $b_{Cu} \dots \text{Kupferinfrastrukturbreite} \rightarrow \text{Leerrohrkapazität } r = b_{Cu} * (1/p_{Cu} - 1)$
$\rho_{max}=$	<input type="text" value=""/>		max. Kapazität eines Standardrohres in Millimeter; Anzahl Leerrohre = $\text{Ceil}(r/\rho_{max})$
$\rho_{sum\_max} =$	<input type="text" value=""/>		max. Kapazität aller Leerrohre pro Kante in Millimeter

In diesem Beispiel wurde das Modell `GrowFromHV` angewendet; es wird Leerrohr-Infrastruktur auf einer Gesamtkupferlänge von 70%, ausgehend vom Hauptverteilerstandort Kanten, installiert – die Referenzlänge ist dabei durch alle Kanten mit Cu-Infrastruktur, die entweder zum Amts- oder zum Zwischen-Verteilkabelnetz gehören, gegeben. Die Summe der Leerrohr-Kapazitäten über alle emulierten Leerrohre ist mit 50 Zentimeter beschränkt.

**Modellergebnis:**

[1] Leerrohrkapazität von - bis in Millimeter      [2] Summe Kantenlängen mit entsprechender Leerrohrkapazität in Meter  
 [3] Prozentualer Anteil von [2] bezogen auf die Gesamtkupferlänge des Graphen      [4] durchschnittliche Distanz entlang der Kupfer-Infrastruktur zum HV in Meter

[1]	[2]	[3]	[4]
0,00	50,00	14.543,67	5,81
50,00	100,00	4.389,97	1,75
100,00	150,00	7.451,09	2,98
150,00	200,00	86,60	0,03
200,00	250,00	145,93	0,06
250,00	300,00	729,46	0,29
350,00	400,00	44,73	0,02
450,00	500,00	684,77	0,27

Die oben stehende Tabelle analysiert die Plausibilität des Modellergebnisses. Wir betrachten die räumliche Verteilung der Resterohrkapazität-Klassen.

## 5.4 Fiber-Generator

Wir beschreiben den Report des Generators anhand des nachfolgenden Beispiels sofern die Einträge nicht selbst-erklärend sind; vergleiche dazu Abschnitt 3.3.

Report Fiber-Generator		
Modellparameter		
NGA Solver =	NGASolver.exe	max. Solver CPU Zeit = 10 in Sekunden
FTTb-Quota =	10,00	Prozentsatz der KA, die direkt mit Glasfaser versorgt werden
Kabel-Reserve =	20,00	Prozentsatz an Reservefasern in errechneter Glasfaser-Versorgung
Modellergebnis		
[1] Anzahl an nutzbaren Fasern	[2] Summe Kantenlängen mit entsprechender Fasernanzahl in Meter	
[3] durchschnittliche Distanz entlang der emulierten Glasfaser-Infrastruktur bis zum HV in Meter		
[1]	[2]	[3]
8	1.355,67	723,36
15	811,91	705,41
29	69,22	384,23
36	89,07	304,72
44	106,58	196,99
58	146,16	40,70

Es existiert bereits Glasfaser-Infrastruktur für 10% der potentiellen Einheiten; ein Reserve-Overhead von 20% (zu den bestehenden Fasern) wird als nutzbare Glasfaser-Infrastruktur addiert. Die nachfolgenden Tabelle analysiert die räumliche Verteilung der nutzbaren Glasfaser-Infrastruktur.

## 5.5 NGA-Solver

### 5.5.1 Gesamtergebnis

Als Gesamtergebnis des NGA Solver definieren wir die Kosten pro potentielle Einheit (Teilnehmer-Anschlusseinrichtung). Wir dividieren dabei die Gesamtkosten der Lösung des NGA-Solver (Trassierungs- und Hardwarekosten) durch die Anzahl der betrachteten potentiellen Einheiten.

Das Ergebnis wird am Deckblatt des Reports dargestellt – siehe unten für ein entsprechendes Beispiel:



## Simulationsergebnisse

System RTR\_ACCNET  
NGASolver

Projekt- Identifizierer:	[NOT DEFINED]
--------------------------	---------------

<b>Kosten pro potentieller Einheit in EUR</b>	<b>11.220,76</b>	(berücksichtigt werden die potentiellen Einheiten aller FTTC- oder FTTb versorgten Kabelauslässe)
---	------------------	---

NGASolverReport Version:	1.5.5.0
Erstellt von:	TECHNIKUM\bachhiesl
Datum:	16.06.2015
Zeit:	14:49:06

### 5.5.2 Trassierungsmodell

Die untenstehende Sektion schlüsselt alle Parameter auf, die das Trassierungsmodell des NGA-Solver beeinflussen. Dies sind die spezifischen Verlegekosten der Landnutzungsklassen sowie die Aktivierungskosten für die Erweiterung des Glasfasernetzes. In der Ergebnissection werden Verlege- und Aktivierungslängen als auch Verlege- und Aktivierungskosten aufgeschlüsselt.

#### Parameter und Ergebnis:

Verlegelänge pro Landnutzung = Summe der Längen aller Kanten mit entsprechender Landnutzung, auf denen Neuverlegungen durchgeführt werden  
 Verlegekosten pro Landnutzung = Summe der Kosten aller Kanten mit entsprechender Landnutzung, auf denen Neuverlegungen durchgeführt werden  
 Gesamtverlegelänge = Summe der Längen aller Kanten, auf denen Neuverlegungen durchgeführt werden  
 Gesamtverlegekosten = Summe der Kosten aller Kanten auf denen Neuverlegungen durchgeführt werden

#### Landnutzungen:

[1] Verlegelänge pro Landnutzung in Meter  
 [2] Anteil Verlegelänge pro Landnutzung an Gesamtverlegelänge in Proze  
 [3] Verlegekosten pro Landnutzung und Meter in EUR (Solver)  
 [4] Verlegekosten pro Landnutzung und Meter in EUR  
 [5] Verlegekosten pro Landnutzung in EUR  
 [6] Verlegekostenanteil pro Landnutzung an Gesamtverlegekosten in Proze

Landnutzungsklasse	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
Bauflaeche_begruent	13.364,89	27,20	58,00	58,00	775.163,90	22,94
Querung_Bauflaeche_begruent	3.414,78	6,95	58,00	58,00	198.057,13	5,86
Wald	9.669,90	19,68	58,00	58,00	560.854,18	16,60
Querung_Strassenanlage	1.374,24	2,80	167,00	167,00	229.498,67	6,79
Wiese	6.958,71	14,16	58,00	58,00	403.604,90	11,94
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Streuobstwiese	104,94	0,21	94,00	94,00	9.864,80	0,29
Gebaeude	35,54	0,07	500,00	500,00	17.768,32	0,53
Gaerten_Gt	17,54	0,04	94,00	94,00	1.648,62	0,05

**Ergebnis:**

Aktivierungslänge = Summe der Längen aller Kanten, auf denen bestehende Infrastruktur (Leerrohr oder existierende Fasern), aktiviert wurde

Aktivierungskosten pro existierender Infrastruktur und Meter in EURO	Solver	Report
Leerrohr=	0,02	0,00
existierende Faser =	0,01	0,00

Gesamtverlegelänge in Meter =	49.126,69	Verlegekosten in EUR =	3.379.044,85
Aktivierungslänge Leerrohr in Meter =	5.890,10	Aktivierungskosten Leerrohr in EUR =	0,00
Aktivierungslänge existierende Fasern in Meter =	999,92	Aktivierungskosten existierende Fasern in EUR =	0,00

Zusätzlich werden die Errichtungskosten für die Cu-Versorgungstrecken zwischen ARUs und FTTC-versorgten Kabelauslässen aufgeschlüsselt:

**FTTC -Ergebnis (Trassierungskosten für Cu-Strecken ARU - KA):**

Verlegelänge pro Landnutzung = Summe der Längen aller Kanten mit entsprechender Landnutzung, auf denen Neuverlegungen durchgeführt werden  
 Verlegekosten pro Landnutzung = Summe der Kosten aller Kanten mit entsprechender Landnutzung, auf denen Neuverlegungen durchgeführt werden

Landnutzungen:

- [1] Verlegelänge pro Landnutzung in Meter
- [2] Verlegekosten pro Landnutzung und Meter in EUR
- [3] Verlegekosten pro Landnutzung in EUR

Landnutzungs-kategorie	[1]	[2]	[3]
Querung_Bauflaeche_begruent	18.862,59	58,00	1.094.029,99
Bauflaeche_begruent	68.768,56	58,00	3.988.576,38
Strassenanlage	6.330,42	167,00	1.057.180,10
Bauflaeche_befestigt	1.189,46	167,00	198.639,20
Querung_Strassenanlage	8.843,46	167,00	1.476.858,60
⋮	⋮	⋮	⋮
Streuwiese	1.263,89	58,00	73.305,60
Querung_Unbekannt	1.755,88	500,00	877.940,70
Unbekannt	273,02	500,00	136.508,57
Querung_Streuwiese	60,08	58,00	3.484,85

Gesamtverlegelänge in Meter =	250.079,83	Verlegekosten in EUR =	20.689.509,82
-------------------------------	------------	------------------------	---------------

**5.5.3 Hardware-Modell, ARU-Positionierungen**

Die nachfolgende Sektion zeigt exemplarisch die Parametrierung unterschiedlicher ARU-Typen und als Ergebnis des Solvers die entsprechend installierten Stückzahlen:

**Parameter und Ergebnisse**

ARU's									
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	
[1] ARU Typ Identifizierer	[2] Input Ports	[3] Output Ports	[4] Kosten pro Stück (Solver) in EUR	[5] Kosten pro Stück in EUR	[6] kann von Solver gesetzt werden (ja/nein)	[7] Einschränkung - ARU kann nur auf Knoten mit den folgenden Infrastrukturen gesetzt werden	[8] Stück	[9] Kosten	
1	6	192	20.800,00	20.800,00	ja	keine Einschränkung	22	457.600,00	
2	12	384	27.000,00	27.000,00	ja	keine Einschränkung	1	27.000,00	
3	18	576	40.400,00	40.400,00	ja	keine Einschränkung	0	0,00	
4	20	1500	136.500,00	136.500,00	nein	keine Einschränkung	0	0,00	
								Gesamtkosten ARUs =	484.600,00

Nachfolgend wird die Parametrierung der FTTC-Versorgungsgüte beschrieben bzw. die vorgegebenen Quota analysiert.

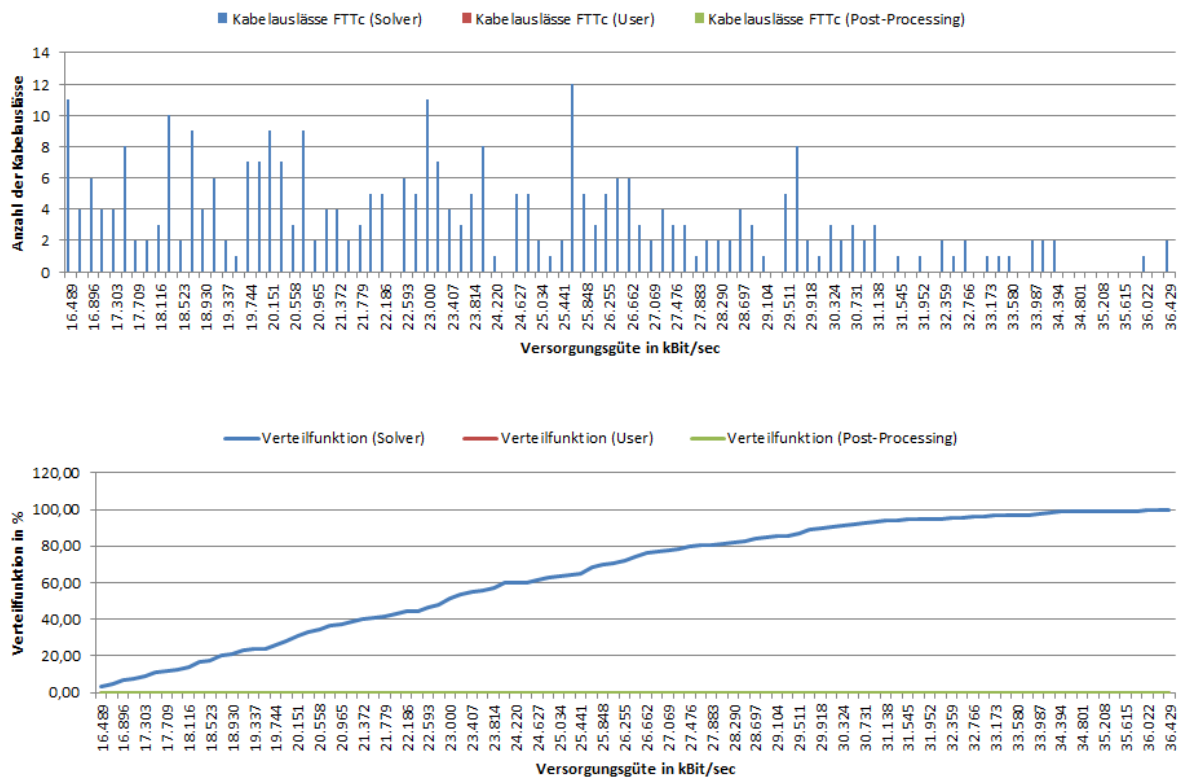
Anschlussobjekte

FTTc-Versorgungsgüte ARU: Kabelauslässe werden über ARUs derart versorgt, dass eine **minimale** **Bitrate** von **16.384,00** **kBit/sec** nicht **unter** -schritten wird.

FTTc-Versorgungsgüte Hauptverteiler: Kabelauslässe werden vom HV derart versorgt, dass eine **maximale** **Dämpfung** von **7,00** **dB** nicht **über** -schritten wird.

Kabelauslässe FTTc-versorgt =	795	(in Prozent	58,50	)
Potentielle Einheiten FTTc-versorgt =	2.256	(in Prozent	70,54	%, angestrebt waren <b>70,00</b> %)
Kabelauslässe FTTb-versorgt =	70	(in Prozent	5,15	)
Potentielle Einheiten FTTb-versorgt =	322	(in Prozent	10,07	%, angestrebt waren <b>10,00</b> %)
Anzahl der versorgten BTS-Objekte=	3	(mit jeweils	6	Fasern pro Objekt) (in Prozent <b>100,00</b> %)
Anzahl der versorgten B2B-Objekte =	0	(mit jeweils	6	Fasern pro Objekt) (in Prozent <b>100,00</b> %)

Die Versorgungsgüte von FTTc-versorgten Kabelauslässen (bzw. den dahinterliegenden potentiellen Einheiten) wird durch ein Histogramm und die entsprechende Verteilung beschrieben:



Die nachfolgenden Tabellen beschreiben die Parametrierung von Komponenten-Typen. Als Ergebnis des Solvers werden entsprechende Verlegelängen und Stückzahlen angegeben:

## Ducts

[1] Duct-Identifizierer [2] maximale Anzahl an Kabel [3] für Erdverlegung geeignet  
 [4] Mini- oder Mikroduct [5] benötigte Leerrohrkapazität [6] Kosten pro Meter in EUR (Solver) [7] Kosten pro Meter in EUR  
 [8] Installationslänge in Meter [9] Kosten in EUR

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
1	9	ja	Mini	1,00	9,00	9,00	35.109,82	315.988,42
2	5	ja	Mini	1,00	8,00	8,00	13.136,43	105.091,42
3	1	ja	Mini	1,00	3,29	3,29	28.671,53	94.329,34
4	24	ja	Micro	1,00	12,00	12,00	0,00	0,00
5	10	ja	Micro	1,00	10,00	10,00	0,00	0,00
6	2	ja	Micro	1,00	4,00	4,00	0,00	0,00
7	16	nein	Mini	100,00	21,82	21,82	0,00	0,00
8	8	nein	Mini	100,00	12,37	12,37	0,00	0,00
9	7	nein	Mini	50,00	9,40	9,40	9.817,90	92.288,27
10	5	nein	Mini	40,00	8,00	8,00	2.243,10	17.944,83
11	3	nein	Mini	32,00	7,98	7,98	738,01	5.889,28
12	1	nein	Mini	25,00	4,16	4,16	3.580,99	14.896,94
Gesamtkosten Ducts =								646.428,49

## Glasfaserkabel

[1] Kabel-Identifizierer [2] Anzahl an Fasern [3] Mini- oder Mikroduct  
 [4] max. durchgängige Verlegelänge [5] Kosten pro Meter in EUR (Solver) [6] Kosten pro Meter in EUR  
 [7] Installationslänge in Meter [8] Kosten in EUR

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	
1	72	Mini	5.500,00	3,60	3,60	0,00	0,00	
2	36	Mini	5.500,00	3,00	3,00	140.969,50	422.908,51	
3	12	Mini	5.500,00	2,65	2,65	392.805,16	1.040.933,67	
4	12	Micro	5.500,00	3,74	3,74	0,00	0,00	
Gesamtkosten Kabel =								1.463.842,18

## Glasfasermuffen und Splitter:

[1] Muffen-Identifizierer [2] Inputports [3] Outputports  
 [4] Kosten pro Stück in EUR (Solver) [5] Kosten pro Stück in EUR [6] Anzahl der installierten Stück  
 [7] Kosten

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1	144	144	2.100,00	2.100,00	14	29.400,00
Gesamtkosten Muffen =						29.400,00

[1] Splitter-Identifizierer [2] Inputports [3] Outputports  
 [4] Kosten pro Stück in EUR (Solver) [5] Kosten pro Stück in EUR [6] Anzahl der installierten Stück  
 [7] Kosten

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1	4	16	1.635,00	1.635,00	70	114.450,00
2	5	32	2.970,00	2.970,00	0	0,00
Gesamtkosten Splitter =						114.450,00

Zusätzlich werden jene Cu-Komponenten beschrieben, die auf der Cu-Versorgungsstrecke zwischen ARUs und FTTC-versorgten Kabelauslässen anfallen:

## Cu-Kabel und Cu-Komponenten (FTTc Versorgung ARUs zu Kabelauslässen)

[1] Kabel-Identifizierer bezogen auf die Cu-Kabelparameter  
des Cu-Generators (siehe entsprechender Report)  
[2] Installationslänge in Meter  
[3] Kosten pro Meter in EUR [4] Kosten in EUR

[1]	[2]	[3]	[4]
1	119507,08	1,03	123.092,29
2	61061,92	2,34	142.884,90
3	28347,41	7,30	206.936,07
5	1369,55	45,80	62.725,23
Gesamtkosten Cu-Kabel =			535.638,50

[1] Komponenten-Identifizierer bezogen auf die Cu-Komponenten-  
parameter des Cu-Generators (siehe entsprechender Report)  
[2] Anzahl installierte Stück [3] Stückkosten in EUR  
[4] Kosten in EUR

[1]	[2]	[3]	[4]
13	853	600,00	511.800,00
8	532	1.100,00	585.200,00
9	185	1.700,00	314.500,00
10	34	2.200,00	74.800,00
14	12	1.000,00	12.000,00
22	4	6.000,00	24.000,00
12	1	4.000,00	4.000,00
24	1	15.000,00	15.000,00
21	12	3.000,00	36.000,00
20	3	2.300,00	6.900,00
Gesamtkosten Cu-Komponenten =			1.584.200,00

## 6 Literaturverzeichnis

- Bachhiesl, P. (2005). *The OPT- and the SST-Problem for Real World Access Network Design - Basic Definitions and Test Instances*. Arbeitsbericht 01/2005; FH+ Vorhaben NETQUEST.
- Bachhiesl, P. (2006). *The OPT-Standard Problem with Redundancy Requirements; R-Join and Augmentation Approaches*. Arbeitsbericht 01/2006, FH+ Vorhaben NETQUEST.
- Bachhiesl, P. (2008). *Modeling of Passive Optical- and Hybrid Network Infrastructure within the City-Net Domain*. Arbeitsbericht 01/2008, FH+ Folgevorhaben NETQUESTIND.
- BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. (2012). *Katastralmappe SHP Schnittstellenbeschreibung, v.2.3*. Von <http://www.bev.gv.at> abgerufen
- Ford, M., & Lew, H. (1998). *Handbuch Netzwerk-Technologien*. München: Software-Verlag.
- Jungnickel, D. (1999). *Graphs, Networks and Algorithms*. Heidelberg: Springer.
- Klein, R. (2005). *Algorithmische Geometrie*. Heidelberg: Springer.
- Koster, A. M., & Munoz, X. (2010). *Graphs and Algorithms in Communication Networks*. Heidelberg: Springer.
- Nemhauser, G. L., & Wolsey, L. A. (1999). *Integer and Combinatorial Optimization*. New York: John Wiley & Sons.
- NN. (2015). *Wikipedia, Digital Subscriber Line*. Abgerufen am 29. 01 2015 von [http://de.wikipedia.org/wiki/Digital\\_Subscriber\\_Line](http://de.wikipedia.org/wiki/Digital_Subscriber_Line)
- Prosegger, M. (2014). Provide a Real-World Graph Suitable for the Mathematical Optimization of Communication Networks. *International Journal on Advances in Intelligent Systems, S.* 751-761.
- Riggert, W., Martin, C., & Lutz, M. (2014). *Rechnernetze: Grundlagen-Ethernet-Internet*. München: Hanser.

## 7 Index

- Abzweigmuffe.....8
- Access-Remote-Unit .....39
- Aktivierungskosten .....40, 44
- Amtskabelnetz.....13
- Anschlussbereich.....2
- Anschlussobjekt.....7
- ARU-Position
  - mögliche- .....41
  - zulässige- .....42
- ARU-Positionierungsmodell .....41
- Bedarf
  - eines Terminalknoten.....13
- Betriebsmodus
  - Infrastruktur-Emulator- .....38
- Bitratenmodell.....42
- CblOnTerminal.....20, 28, 29
- Cluster
  - Modell .....13
  - Terminal- .....16
- Cluster-Zentrum .....16
- Cu-Generator.....7
  - Hardware-Parameterfile .....7
  - Kontrollfile .....7
  - Kosten-Parameterfile .....7
- Cu-Generator-Report .....46
- Digitale Katastralmappe .....6
- Duct .....34, 40
- Einheit
  - potentielle .....7
- Einhüllrohr .....34, 40
- End-Verteilkabelnetz .....13
- Equalized . .....9
- Fiber
  - Generator .....37
- FTTb
  - Quota.....39
  - Szenario .....39
  - versorgter Kabelauslass .....43
- FTTc
  - Quota.....39
  - Szenario .....39
  - versorgter Kabelauslass .....43
- Generator
  - Fiber- .....37
  - Leerrohr-.....34
- Gesamtlänge
  - Kupfer-.....35
- Graph
  - Netzwerk- .....3
- GrowFromHV .....35
- Hardwaremodell .....41, 44
- Hardware-Parameterfile
  - Cu-Generator .....7
- Hauptverteiler.....7
- Hauptverteilerkreis.....13
- Hierarchie
  - Netzwerk- .....13
- HrdWrOnSubNetw .....28
- HrdWrOnTerminal .....24, 28, 29
- HV
  - Kreis .....13
- Infrastruktur
  - Emulator .....2
- Infrastruktur-Emulator .....2
- Input-/Output-Daten .....2
- KA.....7
- Kabel
  - auslass .....7
- Kabelart....40
- Kabelausslass.....7
  - FTTb-versorgt.....43
  - FTTc-versorgt .....43
- Kabeldisjunktheit .....43
- Kabelverteiler.....8
- Kapazität
  - Gesamt-Leerrohr- .....34
  - Gesamt-Restrohr- .....34
  - Leerrohr- .....34
  - Restrohr- .....34
- Knoten
  - Terminal-.....12, 16
- Kontrollfile
  - Cu-Generator .....7
  - Leerrohr-Generator .....35
  - Leerrohr-Generator- .....36
  - Leerrohr-Generator- .....37
- Kosten
  - Aktivierungs-.....40
  - Report-.....46
  - Solver- .....46
  - Trassierungs-.....18
  - Verlege-.....7, 40
- Kosten-Parameterfile
  - Cu-Generator .....7
- Künettenbreite
  - maximale- .....8
  - Standard- .....8
- Kupfer
  - Gesamtlänge.....35
- Kupferbreite

Gesamt- .....	34	Report .....	46
Leerrohr ...	34	Cu-Generator- .....	46
-Generator .....	34	Reportkosten .....	46
Gesamt-Kapazität .....	34	Restrohr ...	34
-Kapazität .....	34	Gesamt-Kapazität .....	34
Leerrohr-Generator		-Kapazität .....	34
Kontrollfile .....	35	Solver	
MaintainObjects .....	9	NGA- .....	39
Maximal		Solverkosten .....	46
-Dämpfung .....	42	Standard	
Maximaldämpfung .....	39, 42	-Künettenbreite .....	8
Maximaldistanz .....	39, 42	super-adjazent .....	15
Mindestbitrate .....	39, 42	Szenario	
Modell		FTTb- .....	39
ARU-Positionierung .....	41	FTTc- .....	39
Bitraten- .....	42	TAE .....	7
Cluster- .....	13	TakeNrTwinWires .....	37
GrowFromHV .....	35	TASL-Länge .....	39
Hardware- .....	20, 28, 31, 41, 44	Teilnehmeranschlusseinrichtung .....	7
ProjectConnObj .....	11	Teilnehmer-Anschlussleitung .....	39
TakeNrTwinWires .....	37	Terminal	
Trassierungs- .....	18, 41, 44	-Cluster .....	16
Modell ModifyPE		TerminalCluster .....	16
ModifyPE .....	9	Terminalknoten .....	12, 16
ModifyPE . .....	9	Bedarf eines .....	13
Netzwerk		Trassierungs	
Graph- .....	3	Bottom-up Modell .....	18
-hierarchie .....	13	-kosten .....	18
Netzwerkgraph .....	3	-Modell .....	18
Netzwerkhierarchie .....	13	Trassierungsmodell .....	41, 44
NGA		Übertragungsgüte .....	42
-Solver .....	39	-Maß .....	39, 42
Optimierung		Verbindungsstufe .....	8
Versorgungslängen- .....	14	Verlege	
Parameter		-kosten .....	7
Strategische-, Kontroll- .....	2	Verlegekosten .....	40, 44
Parameter-Modell .....	2	Versorgungslängen	
PE .....	7	-Optimierung .....	14
potentielle		Versorgungspfad .....	30
Einheit .....	7	Kabel- .....	30
ProjectConnObj .....	11	physikalischer .....	30
Quota		Wahlamtsbereich .....	2
FTTb- .....	39	Zwischen-Verteilkabelnetz .....	13
FTTc- .....	39		



## 8 Abkürzungsverzeichnis

AKNt.....	Kupfer-Amtskabelnetz
AM .....	Abzweigmuffe
ARU .....	outdoor DSLAM (DSLAM außerhalb des Hauptverteilerstandorts)
ASB.....	Anschlussbereich
B2B.....	Business-to-Business
BTS.....	Base-Transceiver-Station
Cu- .....	Kupfer-
DKM .....	Digitale Katastralmappe
DSLAM ....	Digital-Subscriber-Line-Access-Multiplexer
EVNt.....	Base-Kupfer-Endverteilkabelnetz
FTTb .....	fiber to the building
FTTc .....	fiber to the curb
HV .....	Hauptverteiler (für Zugangsbereich) oder Hauptverteiler-Standort
HV-Kreis...	Hauptverteilerkreis
KA .....	Kabelausschluss
KV.....	Kabelverteiler
NGA .....	Next-Generation-Access
PE.....	potentielle Einheiten (Anzahl an Teilnehmeranschlusseinrichtungen pro Kabelausschluss)
TAE.....	Teilnehmeranschlusseinrichtung
TASL .....	Teilnehmer-Anschlusslänge (Versorgungslänge vom Kabelausschluss bis zur Teilnehmeranschlusseinrichtung)
VM .....	Verbindungs-muffe
ZVNt.....	Kupfer-Zwischenverteilkabelnetz