
Entwicklung von kostenoptimierten räumlichen Szenarien für den strategischen Ausbau der Glasfasernetz-Infrastruktur am Beispiel eines Multi-Utility Unternehmens

*Paulus, G.^a, Prunner, N.^a, Rauter, C.^a, Prossegger, M.^b, Leitner, M.^b,
Werner, J.^b & K. Rossegger^c*

^a*FH Kärnten, Studiengang Geoinformation, Europastrasse 4, A-9524 Villach, Austria*

^b*FH Kärnten, Studiengang Telematik-Netzwerktechnik, Primoschgasse 8, A-9020 Klagenfurt, Austria*

^c*LINZ AG, Linz Strom GmbH, Wiener Straße 151, A-4021 Linz, Austria*

ABSTRACT

Motivation: Die zentrale Fragestellung in dieser Entwicklungspartnerschaft zwischen der FH Kärnten und LINZ AG ist die Unterstützung von Investitionsentscheidungen für den strategischen Ausbau der Glasfasernetzinfrastruktur.

Ergebnisse: Die im Rahmen des FHplus- Strukturaufbauvorhabens NETQUEST entwickelten Methoden im Bereich der Geodatenmodellierung und der darauf basierten Generierung von gewichteten Graphen als Grundlage für die kombinatorische Optimierung (Steiner- bzw. Price- Collecting- Steiner-Baum Probleme) wurden an die Anforderungen eines Multi-Utility- Unternehmens (Strom, Telekommunikation, Gas, Verkehr, Wasser, Abwasser) erfolgreich adaptiert und weiterentwickelt. Es wurden 2 Szenarien für den Glasfasernetzausbau simuliert, die als Ergebnis (1) das optimale Investitionsvolumen für eine Neutrassierung unter Berücksichtigung des erwarteten Umsatzes resultierend aus branchenspezifischen Kundenanschlussobjekten und (2) eine Trassenoptimierung und Simulation der Investitionskosten für eine Glasfaservollvernetzung von ausgewählten Produktions- und Servicestandorten der LINZ AG liefern.

Schlussfolgerung: Mit der im Rahmen des FHplus Strukturaufbauvorhabens NETQUEST entwickelten interdisziplinären, szenariobasierten Methodik zur kostenoptimierten Trassenplanung auf Basis von Geodaten ist es möglich, reale Investitionsszenarien für den strategischen Ausbau der Netzinfrastuktur eines Multi-Utility Unternehmens zur Unterstützung von Investitionsentscheidungen zu berechnen.

Kontakt: gernet.paulus@fh-kaernten.at

1 EINLEITUNG

Die Planung und Realisierung von neuen Glasfasernetzinfrastrukturtrassen stellt für Versorgungsunternehmen einen komplexen und sehr kostenintensiven Prozess dar, bei dem eine Vielzahl von raumplanerischen, rechtlichen, technischen und ökonomischen Faktoren zu berücksichtigen ist. Für den

Ausbau eines Versorgungsgebietes gilt es, eine Vielzahl von möglichen Kombinationen dieser Faktoren im Planungsprozess zu berücksichtigen, um einen möglichst kostenoptimalen Trassenverlauf festlegen zu können. Die Simulation und der Vergleich von unterschiedlichen Planungsszenarien zur Unterstützung von Investitionsentscheidungen für den strategischen Ausbau der Glasfasernetzinfrastruktur ist die zentrale Fragestellung der Entwicklungspartnerschaft zwischen der FH Kärnten und LINZ AG, die im Rahmen des von der FFG geförderten FHplus Strukturaufbauvorhaben NETQUEST umgesetzt wird.

2 METHODIK

In einem Pilotprojektgebiet im Versorgungsgebiet der LINZ AG werden die im Rahmen des Strukturaufbauvorhabens neu entwickelten Methoden im Bereich der Geodatenmodellierung und der darauf basierten Generierung von gewichteten Graphen als Grundlage für die kombinatorische Optimierung (Steiner- bzw. Price Collecting Steiner- Baum Probleme) an die Anforderungen eines Multi-Utility-Unternehmens (Strom, Telekommunikation, Gas, Verkehr, Wasser, Abwasser) adaptiert und weiterentwickelt. Es wurden 2 Szenarien für den Glasfasernetzausbau definiert: (1) Abschätzung des optimalen Investitionsvolumens für eine Neutrassierung in einem Projektgebiet unter Berücksichtigung des erwarteten Umsatzes, der aus einer gegebenen Menge von ausgewählten Anschlussobjekten resultiert. Eine spezifische Erweiterung stellt dabei die Berücksichtigung von Diensten, die über das Stromnetz angeboten werden, dar. (2) Trassenoptimierung und Simulation der Investitionskosten für eine Glasfaservollvernetzung von ausgewählten Produktions- und Servicestandorten der Linz AG. Bei beiden Szenarien sind branchenabhängige Standortpotentiale von Anschlussobjekten, nutzungsflächenabhängige Grabungskosten sowie die Ausnutzung von Synergien durch die Integration von bereits bestehender Netzinfrastruktur (Glasfaser, Strom) und nutzbarer Infrastruktur (z.B. existierende Leerrohre) zu berücksichtigen. Die erwarteten Investitionskosten setzen sich aus den Grabungskosten für den Leitungsbau, Kosten für mögliche Mitverlegung bei alternativen Trassenprojekten, die Nutzung von bestehenden Leerrohren sowie den Hardwarekosten zusammen. Der neu entwickelte räumliche Entscheidungsunterstützungsprozess ist in 3 methodische Bereiche gegliedert, die in den nachfolgenden Kapiteln im Detail diskutiert werden.

2.1 Normierte Geodaten

Normierte Geodaten stellen die generalisierten, topologisch korrekten Nutzungsflächen der Digitalen Katastralmappe (DKM) dar, die um für die Graphgenerierung relevante Flächen wie Straßenkreuzungsflächen und Querungsflächen (Eisenbahnübergänge, Brücken über Gewässer) automatisiert bzw. semiautomatisiert erweitert werden [1]. Basierend auf Vertriebsinformationen und räumliche Analysen werden die branchenspezifischen Umsatzpotentiale für Standorte bzw. potentielle Anschlussobjekte bestimmt. Weiters werden bestehende Netzinfrastruktur (umfasst Stromnetz, Glasfasernetz) sowie die nutzbare Infrastruktur (zu tauschende Stromtrassensegmente (Alter, Querschnitt) und existierende Leerrohre, z.B. kostengünstige Straßenquerungen durch Einblasen statt Neugrabung) in den Geobasisdatensatz integriert [2] (Abb. 1). Die Implementierung des Prozesses der Geodatenintegration ist in einem FME (Feature Manipulation Engine) – Modell umgesetzt, der eine automatisierte Aufbereitung eines Projektgebietes auf Basis von definierten Geobasisdaten gewährleistet.



Abbildung 1. Ausschnitt der digitalen Katastralmappe (DKM) mit planungsrelevanten Landnutzungsklassen. Straßenkreuzungen und Übergänge (z.B. Brücken), die nicht in den Originaldaten enthalten sind, wurden automatisiert neu generiert.

2.2 Gewichtete Graphen

Die topologische Struktur der gegebenen Landnutzungsklassen wird als grundlegende geometrische Basis für die Generierung des gewichteten Graphen verwendet. Zusätzlich werden pro Szenario die spezifischen Vorgaben des Netzwerkerrichters erhoben und sowohl in der Erzeugung als auch in der Gewichtung des Graphen berücksichtigt. An geeigneten Stellen werden mit Hilfe eines vorgegebenen Distanzkriteriums zusätzliche Möglichkeiten zur Querung von ausgewählten Landnutzungen erzeugt. Zu diesen gehören der Fahrbahnbereich, Bahntrassen und fließende Gewässer. Um die eindeutige Unterscheidung zwischen Querungen und Kanten entlang der Landnutzungsgrenze zu ermöglichen, werden Querungen eindeutig klassifiziert. Typischerweise liegen die Anschlussobjekte als isolierte Knoten innerhalb von Polygonen, die Gebäude repräsentieren. Zum Anschluss dieser Knoten an den restlichen Graphen werden neue Kanten mit Hilfe orthogonaler Projektionen auf die umliegenden Gebäudekanten erzeugt. Das eigene Leitungsnetz des Netzwerkerrichters sowie verfügbare Infrastruktur (z.B. Leerrohre oder Leased-Lines) werden als Kanten in den Graph übernommen. Dabei werden Beschränkungen bezüglich der Anschlussmöglichkeiten berücksichtigt und im Graph abgebildet.

Die Gewichtung des erzeugten Graphen erfolgt anhand eines mit Expertenwissen erstellten Regelsystems und ermöglicht dadurch eine rasche und valide Anpassung an unterschiedliche Domänen und Szenarien. Für jede planungsrelevante Landnutzungsklasse erfolgt eine Zuweisung von durchschnittlichen Errichtungskosten pro Meter. Zusätzlich müssen die einmaligen Kosten für die Verwendung von

bestehender Infrastruktur bzw. die einmaligen Durchleitungskosten für Leased-Lines im Regelsatz abgebildet werden. Anhand der Vorgaben des Netzwerkerrichters wird je ein Regelsatz für die Filterung von nicht relevanten Kanten sowie ein Regelsatz für die Gewichtung der Kanten erzeugt. So kann zum Beispiel mit einer Regel die Nutzung von Leased-Lines ausgeschlossen werden bzw. das eigene bestehende Netz als kostengünstige Alternative bevorzugt werden. Schließen die Vorgaben des Netzwerkerrichters einen Trassenverlauf durch eine oder mehrere Landnutzungsklassen aus, so werden alle betreffenden Kanten aus dem Graph gelöscht. Obwohl im Modell für den Netzwerkerrichter keine Kosten für die In-House Verkabelung anfallen, werden diesen Kanten trotzdem spezifische Errichtungskosten zugewiesen. Würde man auf diese Zuweisung verzichten bzw. die Kanten mit einer Gewichtung von 0€ pro Meter versehen, würde der optimierte Trassenverlauf vor allem entlang dieser Kanten verlaufen. Um dieses unerwünschte Verhalten zu umgehen, werden den Kanten die Kosten als Penaltykosten zugewiesen und nach der Optimierung wieder korrigiert bzw. durch einen vom Netzwerkerrichter vorgegebenen Pauschalbetrag ersetzt.

2.3 Simulations- und Optimierungsmodelle zur Netzwerkinfrastrukturplanung

Bei den betrachteten Szenarien handelt es sich einerseits um klassische (Price Collecting) Steiner Baum Probleme [4], und andererseits, bei jenen Szenarien bei denen Dienste über das Stromnetz angeboten werden, um spezielle Varianten des (Price Collecting) Connected Facility Location Problems [5]. Je nach konkreter Aufgabenstellung wird zwischen sogenannten Strategic Simulation Tasks (SST) und Operative Planning Tasks (OPT) unterschieden [3]. Bei SST Problemen werden optimale Investitionsvolumina unter Berücksichtigung erwarteter Umsätze ermittelt. Dabei wird auch eine Entscheidung getroffen, welche der potentiellen Anschlussobjekte angeschlossen werden sollen und bei welchen dies wirtschaftlich keinen Sinn macht. Ziel dabei ist es, den resultierenden Profit, welcher sich aus Summe der Potentiale der angeschlossenen Kunden abzüglich der entstehenden Trassierungskosten ergibt, zu maximieren. Bei OPT Szenarien werden hingegen alle Anschlussobjekte durch eine kostenoptimierte Trassierung verbunden.

Bei Szenarien, die Varianten des (Price Collecting) Connected Facility Location Problems darstellen, müssen zusätzlich Längenbeschränkungen zwischen Anschlussobjekten und jeweils zugeordneten Facilities sowie Kapazitätsbeschränkungen der einzelnen Facilities beachtet werden. Simulationen- und Optimierungen laufen in allen Szenarien in den drei grundlegenden Schritte (1) Preprocessing, (2) Clustering und (3) Optimierung ab.

2.3.1 Preprocessing Aufgrund der Größe des Projektgebietes und den daraus resultierenden sehr großen Graphen (bis zu ca. 200.000 Knoten, 300.000 Kanten und 6000 Anschlußobjekten) ist es nicht möglich bzw. sinnvoll, diese ohne vorheriges Preprocessing in der Optimierung zu verarbeiten.

Deshalb wurden Least-Cost-, Grad-1- und Grad-2-Tests [4] zur Graphreduktion verwendet. Klarerweise können diese Methoden nur dort verwendet werden, wo Längenbeschränkungen nicht relevant sind, da etwa bei einer Ersetzung mehrerer Kanten durch eine einzelne beim Grad-2 Test notwendige Information verloren gehen würde. Mit diesen Methoden konnte, je nach Szenario, eine deutliche Reduktion der Knoten (um ca. 30-60%) und Kanten (um ca. 20-50%) erreicht werden.

2.3.2 Clustering Zur Reduktion der Laufzeit der Optimierung ist es sinnvoll, die nach dem Preprocessing resultierenden, immer noch sehr großen, Graphen in mehrere Cluster zu unterteilen, welche anschließend unabhängig voneinander gelöst werden. Aufgrund der speziellen Struktur des Projektgebietes konnte dieses in mehrere Cluster unterteilt werden, welche nur über bereits bestehenden LWL Inf-

rastruktur verbunden waren, sodass die Lösungsqualität durch dieses Clustering nicht negativ beeinflusst wird.

2.3.3 Optimierung In der Optimierung wird zunächst mittels der Minimum Spanning Tree (MST) Heuristik für das Steiner Baum Problem [6] eine Startlösung erzeugt und diese anschließend mittels lokaler Suche verbessert.

In jedem Schritt der lokalen Suche wird versucht die unmittelbare Umgebung von sogenannten „Schlüsselknoten“ (Anschlussobjekte, sowie Knoten mit Grad größer 2) der aktuellen Lösung zu optimieren. Hierzu werden zunächst alle vom aktuell betrachteten Schlüsselknoten ausgehenden Pfade („Schlüsselpfade“) ermittelt, deren innere Knoten alle Grad zwei haben und keine Kundenknoten sind. Diese Pfade werden anschließend temporär aus der Lösung entfernt und mittels der MST Heuristik ein neuer Steiner Baum für dieses Teilproblem ermittelt, wobei alle Kanten der restlichen Lösung als Pseudoinfrastruktur (Kantenkosten gleich null) verwendet werden. Die Kundenknoten für ein derartiges Subproblem ergeben sich aus den Endknoten der ursprünglichen Schlüsselpfade abzüglich des betrachteten Schlüsselknoten selbst, falls dieser kein Kundenknoten ist.

Die beste auf diese Art gefundene Nachbarlösung wird anschließend übernommen (best improvement) und der Prozess solange wiederholt, bis keine Verbesserung mehr erreicht werden kann. Nach Terminierung der lokalen Suche in einem lokalen Optimum, werden in SST Szenarien nicht profitable Teilbäume aus der Lösung entfernt.

Die eventuell nötige Zuordnung von Anschlussobjekten zu Facilities erfolgt vor oben beschriebener Heuristik mittels einer einfachen Greedy Heuristik. Anschließend wird die oben beschriebene Heuristik zur Optimierung verwendet, wobei die Facilities nun als Kundenknoten dienen.

3 ERGEBNISSE

Die umfassende Visualisierung und Dokumentation der simulierten Ergebnisse ist ein wesentliches Kriterium für die Entscheidungsunterstützung. Die Visualisierung je Szenario erfolgt durch eine kartenmäßige Darstellung der optimierten Neutrassierungen. Abbildung 2 zeigt für einen Ausschnitt aus dem Projektgebiet den Verlauf der kostenoptimierten Trassen für den Ausbau des Glasfasernetzes für das SST- Szenario und das OPT Szenario.

Zusätzlich erfolgt eine quantitative Trassenbeschreibung durch statistische Parameter wie Trassenlänge oder Anteil der jeweiligen Nutzungsflächen an den optimierten Trassen. Die Berechnung der szenariospezifischen Investitionskosten liefert in Abhängigkeit der jeweiligen Laufzeit sowie vorgegebener Marktpenetration die simulierten Grabungs- und Hardwarekosten sowie die erwarteten Umsätze und die profitabelsten Anschlussobjekte.

4 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit der im Rahmen des FH- plus Strukturaufbauvorhabens NETQUEST entwickelten interdisziplinäre, szenariobasierte Methodik zur kostenoptimierten Trassenplanung auf Basis von Geodaten ist es möglich, reale Investitionsszenarien für den strategischen Ausbau der Netzinfrastuktur zur Entscheidungsunterstützung zu berechnen. Die mathematische Kostenoptimierung erfolgt dabei auf Basis der konstruierten gewichteten Graphen. Die Parametrisierung der Umsatzpotentiale sowie der den Nutzungsflächen zugewiesenen Grabungskosten erfolgt dabei flexibel und wird für jedes Projektgebiet in enger Zusammenarbeit mit dem Vertrieb und der Planungsabteilung adaptiert. Gerade für Multi-Utility-Unternehmen ist es wichtig, entsprechendes Synergiepotential bei der Trassenplanung zur Grabungskostenreduktion durch Berücksichtigung von zu tauschenden Stromtrassensegmenten oder vorhandenen Leerrohren zu nutzen.

Strategic Simulation Task (SST) Operative Planning Task (OPT)

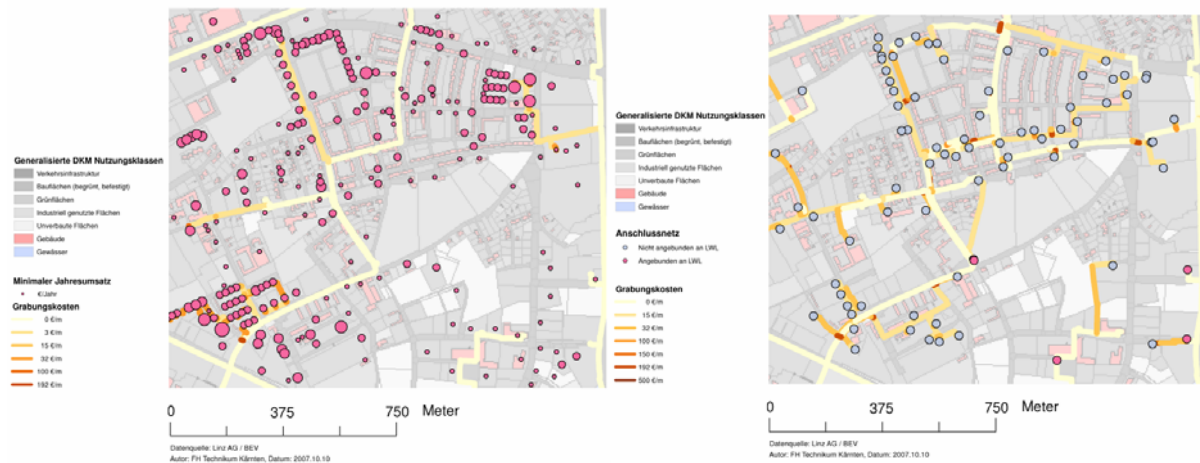


Abbildung 2. Kostenoptimierter Trassenverlauf für SST Szenario und OPT Szenario.

Dies ist durch die Integration dieser nutzbaren Infrastruktur im resultieren den Graphen gelungen. Unschärfen in den Geodaten, wie z.B. nicht vorhandene, planungsrelevante Informationen wie Übergänge über Gewässer oder Eisenbahnlinien oder die fehlende Nachführung von Nutzungsänderungen können lokal zu suboptimalen Ergebnissen führen. Weiters ist zu beachten, dass die Simulation in Abhängigkeit der gewählten Parameter die für das jeweilige Projektgebiet globale Optimierungsergebnisse liefert, die lokal von empirisch geplanten Trassierungen abweichen können.

5 DANKSAGUNG

Das FH- plus Strukturaufbauvorhaben NETQUEST (Ref. Nr. 811378) ist durch die Österreichische Forschungsförderungsgemeinschaft FFG gefördert.

REFERENZEN

- [1] Krch, M., Prunner, N., Paulus, G. (2007): Entwicklung und Implementierung eines Workflow zur Normierung von Geodaten auf Basis der Digitalen Katastralmappe (DKM). Interner Arbeitsbericht 01/2007 FHplus Projekt NETQUEST.
- [2] Paulus, G., Prunner, N. (2007): Integration bestehender Netzwerkinfrastrukturen in die Graphengenerierung – Benchmarkprojekt LinzAG, Interner Arbeitsbericht 05/2007, FHplus Projekt NETQUEST.
- [3] Bachhiesl, P. (2005): The OPT- and the SST-problems for real world access network design – basic definitions and test instances. Working Report Nr. 01/2005, Carinthia Tech Institute, Departement of Telematics and Network Engineering, Klagenfurt, Austria.
- [4] Ljubic, I. (2004): Exact and Memetic Algorithms for Two Network Design Problems. PhD Thesis, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
- [5] Karger, D.R., Minkoff, M. (2000): Building Steiner trees with incomplete global knowledge. Proceeding of 41st Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 613-623.
- [6] Melhorn, K. (1988): A faster approximation for the Steiner problem in graphs. Information Processing Letters, 27: 125-128.