
Zusammenfassung der Promotionsschrift

**Automatisierte Infrastrukturplanung von
Glasfasernetzen**

Automated Infrastructure Planning of Fiber Optic Networks

verfasst von

Jens Wiggenbrock

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

An der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

Mentor: Prof. Dr.-Ing. Kay Smarsly

Status des Doktoranden: Extern

Weimar, 30.04.2019

Problemstellung

1. Der flächendeckende Ausbau mit zukunftsfähigen Glasfasernetzen verläuft in Deutschland vergleichsweise langsam. Die Verlegung der Glasfasern bis zu jedem Gebäude ist aufgrund der Tiefbauarbeiten sehr kostenintensiv.
2. Die Kosten für den Glasfasernetzausbau innerhalb von Siedlungsgebieten können aktuell erst durch aufwändige Planungsarbeiten ermittelt werden. Eine konkrete Planung ist Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Projektentwicklung, behördliche Genehmigungen und Preisverhandlungen mit Lieferanten und Bauunternehmen. Die Verwendung von pauschalen Planungskennwerten zur Kostenschätzung bietet aufgrund der Einzigartigkeit der Siedlungsstrukturen keine hinreichende Genauigkeit und Planungssicherheit.
3. Aus der Siedlungsstruktur in Deutschland, bestehend aus über 11 000 Gemeinden, die zu 75% jeweils weniger als 5000 Einwohner umfassen, und die wiederum in unterschiedlich viele Siedlungs- und Gewerbegebiete untergliedert sind, ergeben sich entsprechend viele einzelne Planungen.
4. Die Beplanung der Siedlungs- und Gewerbegebiete erfordert ein hohes Maß an Fachkenntnissen und ein gewisses Maß an Ortskenntnissen. Je nach Größe, Koordinierungsaufwand und Detailtiefe kann die Planung eines Glasfasernetzes mehrere Wochen oder Monate dauern.

Zielsetzung der Arbeit

5. Das Ziel dieser Arbeit ist die Effizienzsteigerung der Planungsarbeiten durch die Konzeption und die Implementierung von Methoden und Verfahren für eine computergestützte und weitgehend automatisierte Infrastrukturplanung von Glasfasernetzen.
6. Wesentliche Herausforderung der automatisierten Infrastrukturplanung ist die Erarbeitung eines durchgängigen konzeptuellen Designs, das (a) die Datenintegration unter Nutzung des Raumbezugs, (b) die effiziente Bearbeitung graphentheoretischer Problemstellungen und (c) die Informationsvisualisierung abstrakter sowie raumbezogener Daten unterstützt.
7. Das im Rahmen dieser Arbeit implementierte konzeptuelle Design soll anhand einer bestehenden manuellen Planung eines Siedlungsgebietes validiert werden.
8. Praktisches Ergebnis der Arbeit sollen Installationspläne und fundierte Kostenberechnungen für neu zu errichtende Glasfasernetze in Siedlungs- und Gewerbegebieten sein, die den konsequenten, wirtschaftlichen und somit beschleunigten flächendeckenden Ausbau von leistungsfähigen Glasfasernetzen ermöglichen.

Stand der Wissenschaft

9. Zahlreiche technische Standards ermöglichen eine Vielzahl unterschiedlicher Netztopologien und Netzarchitekturen. Allgemeingültige, ganzheitliche Konzepte zur automatisierten Infrastrukturplanung sowie öffentlich zugängliche Unterlagen zur einheitlichen Infrastrukturplanung von Glasfasernetzen liegen nicht vor. Die Qualität der Planung hängt stark von den Vorgaben und dem Budget des Auftraggebers sowie von der Erfahrung und der Leistung der Planenden ab.
10. Die Planung und Kostenermittlung von Glasfasernetzen kann in verschiedenen Stufen erfolgen. Kostenschätzungen basieren auf Analysen und modellhaften, kennzahlengetriebenen Vergleichen von Gebieten zur statistischen Vorhersage. Die Ergebnisse der vergleichenden Kostenschätzungen dienen meist als Grundlage für die Entscheidung, ob ein Gebiet planerisch

näher betrachtet werden soll. Im Zuge der weiteren detaillierteren Planungen können die Ergebnisse nicht weiterverwendet werden.

11. Planungen mittels Geografischer Informationssysteme sind ein weit verbreitetes Planungsverfahren für Glasfasernetze und werden heute üblicherweise durch geschulte Planer computer-gestützt, aber manuell, durchgeführt. Durch den manuellen Prozess entsteht, je nach Größe des Gebietes und Ausführlichkeit der Planung – binnen Tagen, Wochen und teilweise Monaten – der Plan eines Glasfasernetzes. Die Vor- bzw. Entwurfsplanung umfasst typischerweise die manuelle Erfassung von Gebäuden und die manuelle Planung von Mikrorohrbündeln entlang der Straßen.
12. Moderne Geografische Informationssysteme beinhalten darüber hinaus Werkzeuge, d.h. standardisierte Funktionen und Algorithmen, die es ermöglichen, Koordinaten und Geometrien weiterzuverarbeiten. Eine in späteren Planungsphasen wiederverwendbare, straßenseitengenaue Trassenplanung ist mit diesen Werkzeugen jedoch nicht einfach möglich.
13. Spezialisierte, computergestützte Planungsverfahren bedürfen intensiver manueller Vorbereitungs- und Nacharbeiten und erfüllen nicht die Qualität einer manuellen Planung, insbesondere nicht hinsichtlich der infrastrukturenspezifischen Baubarkeit der geplanten Leitungswege und der Wiederverwendbarkeit der Ergebnisse in der anschließenden manuellen Ausführungsplanung.
14. Trotz computergestützter Kostenschätzungs- und Planungsverfahren bedarf es heute letztlich immer noch einer aufwendigen, detaillierten und manuellen Planung für eine abschließende Investitionsentscheidung zur Errichtung von Glasfasernetzen.

Eingesetzte Methoden

15. Das konzeptuelle Design beinhaltet die Anforderungsermittlung, die System-Modellierung den Architektur- und Design-Entwurf sowie das User-Experience-Design eines modularen intelligenten Assistenzsystems zur automatisierten Infrastrukturplanung von Glasfasernetzen. Die beinhaltenden Komponenten umfassen (i) die infrastrukturenspezifische Definition planungsrelevanter Daten und Datenquellen, (ii) die Analyse verschiedener Algorithmen zur effizienten kombinatorischen Optimierung innerhalb eines graphentheoretischen Modells sowie (iii) die maßstabsgetreue 2D/3D/4D-Visualisierung abstrakter und raumbezogener Daten, insbesondere in einer interaktiven virtuellen Umgebung.
16. Die Definition planungsrelevanter Daten und Datenquellen, insbesondere die Datenintegration internetbasierter Dienste und Microservices, bildet – in Kombination mit der raum- und attributbezogenen Analyse von digitalen Verkehrswegedaten – die Grundlage für die Erstellung des graphentheoretischen Modells zur Optimierung und Simulation von technischen Infrastrukturen in einem definierten Planungsgebiet.
17. Die infrastrukturenspezifische multikriterielle Optimierung von Glasfaser-Leitungstrassen entspricht der Methodik des NP-vollständigen Steinerbaumproblems. Die Approximation geeigneter Lösungen, insbesondere hinsichtlich der infrastrukturenspezifischen Herausforderungen straßenseitengenaue Leitungsverlegung, erfolgt durch die kombinatorische Optimierung und Simulation von „Shortest Path Trees“ und „Minimum Spanning Trees“ auf Basis der Algorithmen von Dijkstra, Prim und Alpert. Die implementierten Algorithmen werden durch den Einsatz von Parallel-Computing beschleunigt.
18. Die Mensch-Maschine-Interaktion zwischen dem intelligenten Assistenzsystem zur automatisierten Infrastrukturplanung und den Planern wird durch Methoden aus dem Bereich der Vi-

sual Analytics-Ansätze realisiert, d.h. die maßstabsgerechte Informationsvisualisierung relevanter Daten und geplanter Infrastrukturen erfolgt durch Echtzeit-Rendering der raum- und attributbezogenen Daten zu 2D/3D- sowie 4D-Modellen. Die visuelle Interaktion unterstützt die effiziente Bearbeitung, Information und Kommunikation.

19. Das implementierte konzeptuelle Design zur automatisierten Infrastrukturplanung von Glasfasernetzen wurde gesamtheitlich gegenüber einer manuellen Entwurfsplanung validiert. Dabei wurden die berechneten Längen, Material- und Arbeitskosten sowie spezifische Qualitätsparameter hinsichtlich der infrastrukturenspezifischen Baubarkeit des geplanten Glasfasernetzes verglichen.

Wesentliche Ergebnisse

20. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass Planungen von Glasfasernetzen durch Kopplung und Weiterentwicklung der vorgestellten Methoden effizient automatisiert werden können. Das erarbeitete konzeptuelle Design mit den integrierten Komponenten für die Datenintegration, die infrastrukturenspezifische multikriterielle Optimierung und Simulation sowie die Informationsvisualisierung erlauben eine schnellere Glasfasernetzplanung und eine gleichzeitig hohe, „baubare“ Planungsqualität.
21. Es konnte gezeigt werden, dass die Wiederverwendbarkeit der Planungsergebnisse mindestens im Bereich der manuellen Entwurfsplanung liegt. Dieser Stand wurde mit den bisherigen computergestützten Planungsverfahren noch nicht erreicht und stellt den neuartigen Charakter der in Arbeit dargestellten Methodenkombination heraus. Dabei bieten die einzelnen eingesetzten Methoden weitere Forschungsfragen, beispielsweise hinsichtlich der automatisierten Auswahl der optimalen Verlegungsmethoden, die in dieser Arbeit auf die Berechnung der kumulierten Kosten begrenzt wurde.
22. Für den flächendeckenden Glasfaserausbau zeigt diese Arbeit, dass die massenhafte, effiziente und detaillierte Beplanung von Siedlungs- und Gewerbegebieten, eine Beschleunigung des Glasfaserausbaus bewirken kann. Die fundierte Kostenberechnung und die detaillierte Trassenplanung ermöglichen zudem eine Priorisierung der Ausbauaktivitäten.
23. Die effiziente Erstellung von Planungsalternativen und Risikoanalysen befördert und beschleunigt die Planungen insgesamt, sodass für ein Gebiet zügig wirtschaftlich tragfähige Lösungen erarbeitet und umgesetzt werden können. Davon profitieren etablierte und neue Netzbetreiber sowie Investoren, Kommunen, Betriebe und Bürger, denn erst mit der flächendeckenden Verfügbarkeit von Glasfasernetzen werden darauf aufbauende Anwendungen möglich.
24. Die hohe Qualität der Planungsergebnisse bietet zudem die Möglichkeit, die Ausbaurkosten durch die synergetische Mitverlegung von Leerrohren bei anderen Baumaßnahmen und Sanierungen enorm zu reduzieren.
25. Für kleinere Gebiete, beispielsweise Gewerbegebiete, die zur weiteren Praxiserprobung geplant wurden, wird mit den vorgestellten Methoden die Qualität einer Ausführungsplanung erreicht. In der Praxisanwendung ermöglicht das konzeptuelle Design neuartigen Methoden zur Informationsvisualisierung, beispielsweise die Darstellung der Pläne als Augmented Reality zur Markierung der geplanten Trassen, Materialien und Technikstandorte bei Begehungen vor Baumaßnahmen. Damit konnte nachgewiesen werden, dass durch das implementierte Konzept Planung, Vor-Ort-Begehungen und die anschließenden Baumaßnahmen effizienter ablaufen können.