

---

# Automatisierte Planung von digitalen Hochgeschwindigkeitsnetzen

---

Jens Wiggenbrock, Kay Smarsly

Eine Version dieses Arbeitspapiers wurde bei der Konferenz „Forum Bauinformatik 2017“ eingereicht, die vom 6. bis zum 8. September 2017 in Dresden stattfindet.

Zitierhinweis:

*Wiggenbrock, J. & Smarsly, K., 2017. Automatisierte Planung von digitalen Hochgeschwindigkeitsnetzen. Arbeitspapier Nr. BUW-IIB-2017.01.1. Professur Informatik im Bauwesen, Bauhaus-Universität Weimar.*

Prof. Dr.-Ing. Kay Smarsly  
Professur Informatik im Bauwesen  
Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystr. 7, Raum 518  
99423 Weimar

Tel.: +49 3643 58 4214  
Fax: +49 3643 58 4216  
E-Mail: [kay.smarsly@uni-weimar.de](mailto:kay.smarsly@uni-weimar.de)  
Web: <http://www.uni-weimar.de/iib>

# Automatisierte Planung von digitalen Hochgeschwindigkeitsnetzen

Jens Wiggenbrock\* und Kay Smarsly

Professur Informatik im Bauwesen, Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystr. 7, 99423 Weimar

\*Kontakt: jens.wiggenbrock@uni-weimar.de

**Abstract**— Der Ausbau von digitalen Hochgeschwindigkeitsnetzen ist gekennzeichnet durch neuartige Anforderungen an den Planungsprozess. Diese Anforderungen erfordern wiederum den Einsatz von neuartigen Paradigmen, die eine effiziente und zugleich genaue Planung von flächendeckenden Glasfasernetzen ermöglichen. Hierbei können wiederkehrende Planungsaufgaben durch eine gezielte computergestützte Automatisierung effizienter und genauer ausgeführt, als es mit bisherigen Planungskonzepten möglich ist. Dieses Arbeitspapier beschreibt die computergestützte Ausführung eines Planungsprozesses auf Basis von fünf grundlegenden, iterativen Planungsschritten und gibt Empfehlungen für eine effiziente und genaue Planung von Glasfasernetzen. Der hier vorgestellte Ansatz ermöglicht es Netzbetreibern und Investoren, den Ausbau beliebiger Siedlungs- und Gewerbegebiete auf der zuverlässigen Basis von belastbarem Faktenwissen wirtschaftlich zu priorisieren.

**Keywords**— Breitbandausbau, Gigabit, Infrastruktur, Hochgeschwindigkeitsnetze, Glasfaser, Planung, FTTx, 5G

## EINLEITUNG

**B**EREITS mit der Einführung der Breitbandstrategie durch die Bundesregierung im Jahr 2009 wurde „schnelles Internet“ zur Grundversorgung erhoben. Bis zum Jahr 2018 soll in Deutschland eine flächendeckende Breitbandversorgung von mindestens 50 Mbit/s aufgebaut werden (Bundesregierung, 2009, 2010; Merkel, 2009). Die „Netzallianz Digitales Deutschland“, eine vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur initiierte Initiative aus Telekommunikationswirtschaft und Politik, hat sich darüber hinaus zum Ziel gesetzt, dass Deutschland bis Ende des Jahres 2025 über die notwendige Infrastruktur für den Einsatz von so genannten Gigabit-Anwendungen verfügt (BMVI, 2017). Die Gigabit-Anwendungen der Zukunft sind bisher nur in Ansätzen erforscht, werden aber mindestens Sensorik-, Echtzeit-, Analyse-, Aktorik- und Virtual Reality-Funktionen vereinen („Internet of Everything“, „Industrie 4.0“). Grundlage der Gigabit-Anwendungen ist die umfassende Vernetzung von Personen und Gegenständen durch neue, leistungsfähigere Kommunikationsnetze. Die daraus resultierenden Anforderungen erfordern den Einsatz von neuartigen Paradigmen, die eine effiziente und zugleich genaue Planung von digitalen Hochgeschwindigkeitsnetzen ermöglichen (Matuschek, 2016; Spath & Ganschar, 2013).

Zitierhinweis: Wiggenbrock, J. & Smarsly, K., 2017. Automatisierte Planung von digitalen Hochgeschwindigkeitsnetzen. Arbeitspapier Nr. BUW-IIB-2017.01.1. Professur Informatik im Bauwesen, Bauhaus-Universität Weimar. Eine Version dieses Arbeitspapiers wurde bei der Konferenz „Forum Bauinformatik 2017“ eingereicht, die vom 6. bis zum 8. September 2017 in Dresden stattfindet.

Glasfasernetze, mit Verbindungen bis zu jedem Gebäude, sind seit Langem als leistungs-, zukunfts- und gigabitfähige Infrastruktur anerkannt (Kaiser, 1991). Die Verlegung von Glasfaserkabeln bis zu jedem Gebäude ist aufgrund der Tiefbauarbeiten jedoch sehr kostenintensiv, insbesondere im dünn besiedelten ländlichen Raum. Die Kosten für den Glasfasernetzausbau innerhalb eines Siedlungsgebietes können derzeit erst durch aufwendige Planungen ermittelt werden (TÜV Rheinland, 2015). Aus der Siedlungsstruktur in Deutschland – bestehend aus über 11 000 Gemeinden, die zu 75% jeweils unter 5000 Einwohnern umfassen (Destatis, 2016) – ergeben sich entsprechend viele aufwendige Einzelplanungen, sodass neue computergestützte, automatisierte Planungswerkzeuge zwingend erforderlich sind.

Die Planung von Infrastruktur, insbesondere von Glasfasernetzen, umfasst mehrere einzelne Stufen, die sich für jede zu erschließende Gemeinde, jedes Siedlungsgebiet, jede Straße und jedes Gebäude wiederholen. Pauschale Planungskennwerte zur Kostenermittlung, die von herkömmlichen Planungswerkzeugen häufig verwendet werden, bieten aufgrund des Unikatcharakters jeder Siedlungsstruktur keine hinreichende Genauigkeit und Planungssicherheit (Neumann & Schwab, 2015; TÜV Rheinland, 2013). Darüber hinaus werden durch die Verwendung von Pauschalen keine Leitungstrassen berechnet, die für eine kostengünstige, synergetische Mitverlegung von Leerrohren erforderlich sind.

Das vorliegende Arbeitspapier beschreibt einen Ansatz zur computergestützten, automatisierten Planung von Glasfasernetzen, der sich auf Forschungsarbeiten der Autoren der letzten Jahre stützt (Wiggenbrock, 2014, 2016; Wiggenbrock & Smarsly, 2016a, 2016b; Wiggenbrock et al., 2014, 2015a, 2015b, 2015c). Der hier beschriebene Ansatz umfasst fünf iterative Stufen zur Planung von Glasfasernetzen, die in ein Softwaresystem zur computergestützten, automatisierten Planung implementiert wurden. Die Stufen setzen zu Beginn der Planung an und bilden die Basis für einen effizienten, iterativen Planungsprozess digitaler Hochgeschwindigkeitsnetze, vom ersten Entwurf bis zur baulichen Umsetzung der Glasfasernetze.

## 5-STUFIGER PROZESS FÜR DIE COMPUTERGESTÜTZTE, AUTOMATISIERTE PLANUNG

Ein strukturierter Planungsprozess ist die Grundlage für eine rationale Planung (Grande et al., 1991). Im Allgemeinen beschreibt die rationale Planung einen iterativen Prozess zur Erstellung zielgerichteter Handlungskonzepte, der mehrere Stufen iterativ und mit zunehmender Detailtiefe durchläuft. Im Folgenden werden die Stufen zur computergestütz-

ten, automatisierten Planung von digitalen Hochgeschwindigkeitsnetzen vorgestellt (Abbildung 1). In der ersten Planungsstufe werden die Infrastruktur- und Planungsziele definiert. Die zweite Planungsstufe beschreibt die Aufbereitung und Analyse von Basis-Geodaten zu planungsrelevanten *Informationen*. Die dritte Stufe umfasst die Planung des Glasfasernetzes mittels erprobter Algorithmen zur Routenplanung. Die vierte Planungsstufe verfolgt das Ziel, die Planungsinformationen und die computergenerierten Netzpläne nutzerfreundlich zu visualisieren und dadurch Trassenverläufe, Kosten sowie Entscheidungen transparent und realitätsnah darzustellen. Die fünfte Planungsstufe beschreibt die Verwendung der Planungsinformationen, Netzpläne und Visualisierungen als Grundlage für ein standardisiertes Berichtswesen zur Investitionsentscheidung.

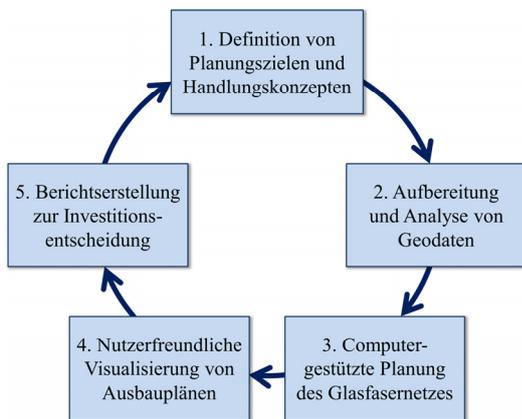


Abb. 1. 5-stufiger Prozess für die computergestützte, automatisierte Planung.

### Stufe 1: Definition von Planungszielen und Handlungskonzepten

Das Planungsziel flächendeckender digitaler Hochgeschwindigkeitsnetze ist die hochdatenratige Anbindung ( $> 1 \text{ Gbit/s}$ ) aller Wohngebäude und Gewerbebetriebe an leistungsfähige Kernstrukturen vorhandener Kommunikationsnetze („Backbone“, vgl. Abbildung 2). Im Verlauf der Planungsiterationen kann die Auswahl der Wohngebäude und Gewerbebetriebe für eine zeitnahe Erschließung mit Glasfaser, aber auch die nachfolgend erläuterte Netztopologie, aus Gründen der Wirtschaftlichkeit variieren.

Die Punkt-zu-Punkt-Anbindung durch einzelne Glasfaserkabel zwischen den anzuschließenden Gebäuden und einem zentralen Vermittlungsknoten, der die Vermittlung mit den Kernstrukturen übernimmt, stellt hinsichtlich der Leistungs- und Erweiterungsfähigkeit eine optimale Lösung dar. Abbildung 2 zeigt eine FTTB/H-Stern-Netz. Weitere mögliche Netztopologien sind beispielsweise FTTC, GPON, WDM-PON. Die Versorgungsbereiche der zentralen Vermittlungsknoten (d.h. der Planungsgebiete) sollten sich an die vorhandenen Infrastrukturen anlehnen, beispielsweise Siedlungsstrukturen, Telefon-Vorwahlbereiche oder Verwaltungsgrenzen.

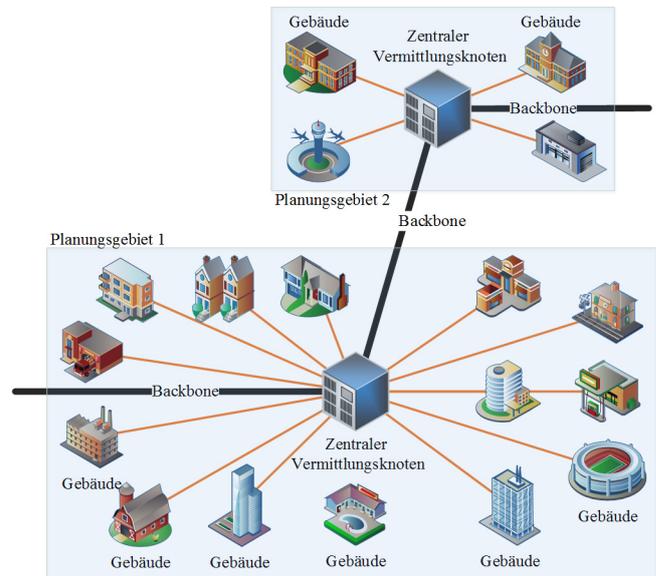


Abb. 2. Netzstruktur als FTTB/H-Stern-Netzwerk.

### Stufe 2: Aufbereitung und Analyse von Geodaten

Die Planung von Glasfasernetzen soll durch computergestützte Methoden und Verfahren effizient umgesetzt werden. Maschinenlesbare Geodaten können hierbei die Basis für einen rationalen Planungsprozess liefern, indem ein Raumbezug zwischen den unabhängigen Einzelinformationen hergestellt wird, die zudem in automatisierten Planungsalgorithmen nutzbar sind. Auszüge aus dem Grunddatenbestand des amtlichen Vermessungswesens können projekt- und gebietsspezifisch bezogen werden und sind deshalb eine wertvolle Quelle für Geodaten. Freie Kartenmaterialien sind weitere, einfach zugängliche Datenquellen für die Planung. Im Verlauf des iterativen Planungsprozesses werden die grundlegenden Geodaten kontinuierlich mit hinzugewonnenen Details und Erkenntnissen angereichert.

Die Karten- und Geodaten enthalten Informationen über die Verläufe von bestehenden Infrastrukturen und Verkehrswegen, Nutzungsarten von Gebäuden, Boden- und Höhenprofile sowie Satelliten- und Luftbilder; sie können mit weiteren Daten aus Adressdatenbanken, Regionalstatistiken und sozialen Netzwerken angereichert werden. Dadurch ergibt sich für das auszubauende Gebiet eine erste Übersicht über Teilnehmende, mögliche Verbindungswege und potentielle Standorte für zentrale Einrichtungen.

### Stufe 3: Computergestützte Planung des Glasfasernetzes

Im Anschluss an die Definition der Planungsziele und die Erfassung aller Netzknoten im Planungsgebiet (zentraler Verteilungsknoten und Gebäude) ist die Planung der Verbindungsstrecken zwischen den Netzknoten die Kernaufgabe der Planung (Wiggenbrock, 2015). Hierbei sind unterschiedlichste Randbedingungen und Umgebungseinflüsse zu berücksichtigen. Häufig werden neue Leitungen entlang bestehender Verkehrswege unterirdisch verlegt. Durch die unterirdische Verlegung erhalten die Leitungen einen größtmöglichen Schutz gegen umweltbedingte Einflüsse und mechanische Einwirkungen. Abhängig von den Eigenschaften des Verkehrsweges ist die Installation neuer Leitungen mit kostenintensiven Tiefbauarbeiten und umfangreichen Baustellenabsicherungsmaßnahmen verbunden.

Die zeitaufwendige manuelle Trassenplanung der (kostengünstigsten) Verbindungsstrecken erfordert genaue Ortskenntnisse, u.a. hinsichtlich einzuholender Wegerechte und fachliches Erfahrungswissen der Planenden. In einer ersten Planungsiteration wird die Verwendung von computergestützten Planungsalgorithmen zur Kostenbewertung aller Verkehrswege und zur Generierung von Trassierungsvorschlägen empfohlen (Abbildung 3). Aus den Trassierungsvorschlägen kann das Investitionsvolumen für den vollständigen Ausbau berechnet und wirtschaftliche Betreiber- oder Förderzuschussmodelle abgeleitet werden.

Die vorausschauende, frühzeitige Bepanung von Siedlungs- und Gewerbegebieten unter konsequenter Verwendung von tagesaktuellen Daten und computergestützten Planungsalgorithmen verringert das Investitionsvolumen, da Synergieeffekte ideal genutzt werden können (z.B. koordinierte Baumaßnahmen und Leerrohrverlegung, innovative Verlegeverfahren).

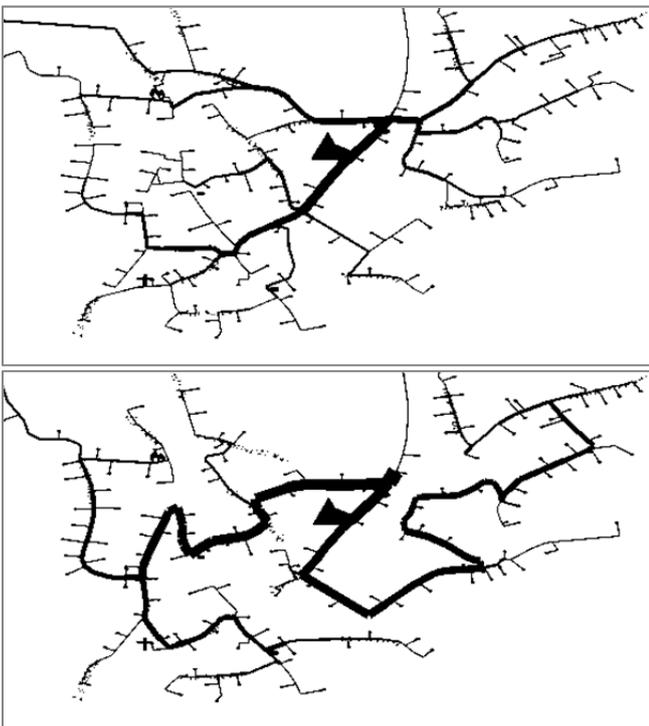


Abb. 3. Beispielhafte Darstellung alternativer Trassierungsvorschläge für ein Glasfasernetz in einem Siedlungsgebiet mit 170 Netzknoten. Quelle: Wiggenbrock (2015).

#### Stufe 4: Nutzerfreundliche Visualisierung von Ausbauplänen

Die nutzerfreundliche Visualisierung des Bauvorhabens durch Installationspläne und vor allem die transparente Darstellung der Installationskosten sind wichtige Instrumente zur gegenseitigen Information der Planenden, der Behörden und der Bevölkerung, die häufig an den Planungsprozessen beteiligt wird. Zudem gründen erfolgreiche Infrastrukturprojekte, besonders im Bereich des Glasfasernetzausbaus, auf einer hohen Anschluss- und Beteiligungsquote der Bevölkerung, die eine der wichtigsten Voraussetzungen für den wirtschaftlichen Glasfaserausbau sind.

Für die nutzerfreundliche Visualisierung der Trassenplanungen wird eine 2D-, 3D- und Virtual-Reality-Überlagerung topografischer Karten und Luftbilder empfohlen, die die Ausbaupläne im Kontext von Bauabschnitten,

Bauverfahren, Baukosten und Synergieeffekten realitätsnah darstellen (Abbildung 4). Den Planenden ist es durch die gleichzeitige Darstellung von Installationsplänen und Installationskosten möglich, kostenintensive Bereiche und mögliche Optimierungspotenziale zu identifizieren, Kosten transparent zu machen und letztlich durch die umfangreiche Transparenz für das Projekt zu werben.

Aus der nutzerfreundlichen Visualisierung (vierte Planungsstufe) der in der dritten Planungsstufe erstellten Ausbaupläne können u.a. konkrete Installationspläne für eine vorausschauende Leerrohrverlegung während anderer Baumaßnahmen abgeleitet werden. Aufgrund der kontinuierlichen Vorbereitungsmaßnahmen kann eine zielgerichtete Verwendung der finanziellen Ressourcen und eine signifikante Beschleunigung des Glasfaserausbaus, insbesondere im ländlichen Raum, erzielt werden.



Abb. 4. Virtual Reality-Visualisierung mit Luftbild, Gebäuden und geplantem Glasfasernetz mit farblicher Darstellung der Installationskosten (rot, gelb, grün). Quelle: Wiggenbrock (2016).

#### Stufe 5: Berichterstellung zur Investitionsentscheidung

Bedingt durch die Siedlungsstruktur in Deutschland – bestehend aus über 11 000 Gemeinden die zu 75% jeweils unter 5000 Einwohnern umfassen – ergeben sich entsprechend viele aufwendige Einzelplanungen. Jede Einzelplanung durchläuft iterativ verschiedene Planungs- und Entscheidungsphasen. Nach den ersten Planungsphasen (Vorbzw. Entwurfsplanung) wird in den anschließenden Entscheidungsphasen die grundsätzliche Wirtschaftlichkeit des Ausbauprojektes beurteilt. Wird eine positive Rentabilität des Ausbauprojektes erwartet, folgen weitere Planungs- und Entscheidungsphasen der Genehmigungs- und Ausführungsplanung.

Aus der dritten und vierten Planungsstufe können grundlegende Kennzahlen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung, beispielsweise Teilnehmeranzahlen, Investitionsvolumina, Materialmengen und anfallende Tiefbauarbeiten, abgeleitet werden. Als effiziente und kostengünstige Alternative zur oben aufgeführten Vielzahl von Einzelplanungen bietet sich ein standardisiertes, computergeneriertes Berichtswesen zur Darstellung der Planungsergebnisse an. Aufgrund der Heterogenität der beteiligten Personen und deren Fachwissen wird empfohlen, den standardisierten Bericht in einen allgemeinen, erklärenden Teil und weitere planungs- und gebietsspezifische Teile zu gliedern. Der allgemeine Teil enthält grundlegende Beschreibungen zu Bandbreitenbedarfen, Glasfasertechnik und möglichen Netztopologien; der spezi-

fische Teil stellt die Planungsleistungen in Kartendarstellungen, Kennzahlen und Diagrammen dar.

Nach jeder Planungsstufe schließt sich eine Entscheidungsphase an, in der auf Basis der erstellten Planungsberichte die grundsätzliche Wirtschaftlichkeit des Ausbauprojektes beurteilt wird. Wird eine positive Rentabilität des Ausbauprojektes erwartet, folgen weitere Planungs- und Entscheidungsphasen, die abermals die fünf genannten Planungsstufen durchlaufen (Abbildung 1). Die Planungsphase schließt mit dem Abschluss von Vorverträgen, der finalen Investitionsentscheidung und der Ausschreibung der Bauleistungen ab.

#### ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Arbeitspapier wurden Gigabit-Anwendungen, die Notwendigkeit von digitalen Hochgeschwindigkeitsnetzen und die Erfordernisse neuartiger Problemlösungsparadigmen zur effizienten und zugleich genauen, computergestützten Planung skizziert. Der Planungsaufwand für einen flächendeckenden Glasfaserausbau wurde anhand von Siedlungsstrukturen in Deutschland beispielhaft dargestellt. Die Reproduzierbarkeit der Planungsaufgaben diente hierbei als Ausgangspunkt zur Herausarbeitung von fünf grundlegenden Schritten eines iterativen Planungsprozesses; dieser umfasst (i) die Definition von Planungszielen und Handlungskonzepten, (ii) die Aufbereitung und Analyse von Geodaten, (iii) die computergestützte Planung des Glasfasernetzes, (iv) die nutzerfreundliche Visualisierung von Trassenplanungen und (v) die Berichterstellung zur Investitionsentscheidung. Der hier vorgeschlagene Ansatz zur computergestützten Ausführung des Planungsprozesses führt zu einer frühzeitigen, effizienten und fundierten Abschätzung des Aufwandes für den Ausbau von Glasfasernetzen. Mit Kenntnis des notwendigen Aufwandes können Netzbetreiber und Investoren den Ausbau beliebiger Siedlungs- und Gewerbegebiete auf Basis von belastbarem Faktenwissen wirtschaftlich priorisieren. Hierdurch wird der strukturierte und flächendeckende Ausbau von leistungsfähigen Glasfasernetzen beschleunigt und damit zusammenhängende Entwicklungen, beispielsweise die „Digitalisierung“ und „Industrie 4.0“, befördert.

#### LITERATUR

- [1] Bundesregierung, 2009. Breitbandstrategie der Bundesregierung – Kräfte bündeln für Deutschlands Zukunft: Wege zu einem schnellen Internetzugang bis in jedes Haus. Bundesregierung, Berlin, 01.02.2009.
- [2] Bundesregierung, 2010. Stand des Breitbandausbaus und Strategie der Bundesregierung zur Breitbandversorgung in Deutschland, Deutscher Bundestag, Berlin, 29.12.2010.
- [3] Destatis, 2016. Daten aus dem Gemeindeverzeichnis. Gemeinden in den Ländern nach Einwohnergrößenklassen auf Grundlage des ZENSUS 2011, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Hessen.
- [4] Grande, E., Kuhlen, R., Lehmbuch, G. & Mäding, H., 1991. Perspektiven der Telekommunikationspolitik. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- [5] Kaiser, W., 1991. Glasfaser bis ins Haus. Vorträge des am 14. und 15. November 1990 in München abgehaltenen Kongresses des Münchner Kreis Übernationale Vereinigung für Kommunikationsforschung. Springer, Berlin.
- [6] Matuschek, I., 2016. Industrie 4.0, Arbeit 4.0 – Gesellschaft 4.0? Eine Literaturstudie. Matuschek I.: Studien, Bd. 2. Rosa Luxemburg Stiftung, Berlin.
- [7] Merkel, A., (Die Bundeskanzlerin, Hrsg.), 2009. Kanzlerin direkt – Schnelles Internet für alle. Podcast. Verfügbar unter <https://www.bundeskanzlerin.de/Content/DE/Podcast/2009/2009-02-28-Video-Podcast/2009-02-28-video-podcast.html>.
- [8] Neumann K.-H. & Schwab, R., 2015. Europäische und weltweite Trends beim Aufbau von FTTH/H Netzen – Bedeutung für Deutschland, WIK-Consult, Bad Honnef.
- [9] Spath, D. & Ganschar, O., 2013. Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Studie. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart.
- [10] Wiggenbrock, J., 2015. Kommunikationskabelnetze mit Ausstellung. Vorträge der 22. ITG-Fachtagung vom 08.-09. Dezember 2015 in Köln (ITG-Fachbericht, Bd. 260). VDE Verlag GmbH, Berlin.
- [11] TÜV Rheinland, 2013. Szenarien und Kosten für eine kosteneffiziente flächendeckende Versorgung der bislang noch nicht mit mindestens 50 Mbit/s versorgten Regionen. Studie. TÜV Rheinland, Berlin.
- [12] TÜV Rheinland, 2015. Ausbau ultraschneller Breitbandnetze. Potentiale von Ausbaustrategien in unterschiedlichen Siedlungsräumen für eine Versorgung mit 100 Mbit/s. Studie. TÜV Rheinland, Berlin.
- [13] Wiggenbrock, J., 2016. Integrierte Visualisierung von Installationsplänen und Installationskosten beim Glasfaser-Breitbandausbau. In: 28. Forum Bauinformatik. Hannover, 19.09.2016.
- [14] Wiggenbrock, J. & Smarsly, K., 2016a. Integrated visualization of installation plans and installation costs of fiber optic networks. In: 10. ITG-Fachkonferenz „Breitbandversorgung in Deutschland 2016“. Berlin, 18.04.2016.
- [15] Wiggenbrock, J. & Smarsly, K., 2016b. Kostengünstiger Breitbandausbau mittels automatisierter Integration von Installationsplänen und Installationskosten. Arbeitspapier Nr. BUW-IIB-2016.01.1. Professur Informatik im Bauwesen, Bauhaus-Universität Weimar, 24.06.2016.
- [16] Wiggenbrock, J., Breide, S. & Smarsly, K., 2014. Methoden zur ressourcenoptimierten Vorplanung von Topologie und Kosten beim Glasfaser-Breitbandausbau. In: 8. ITG Fachkonferenz (Breitbandversorgung in Deutschland). Berlin, 01.04.2014.
- [17] Wiggenbrock J., Dragos, K. & Smarsly, K., 2015a. A combinatorial heuristic algorithm supporting computer-aided planning of optical fiber networks. In: 22. ITG-Fachtagung „Kommunikationskabelnetze“. Köln, 09.12.2015.
- [18] Wiggenbrock, J., Breide, S. & Smarsly, K., 2015b. Infrastrukturvorplanung von Glasfasernetzen unter besonderer Berücksichtigung des ländlichen Raumes. In: 9. ITG-Fachkonferenz „Breitbandversorgung in Deutschland“. Berlin, 21.04.2015.
- [19] Wiggenbrock, J., Breide, S. & Smarsly, K., 2015c. Planung von Glasfaser-Zugangsnetzen in Siedlungsgebieten. In: 16. ITG Fachtagung „Photonische Netze“. Leipzig, 07.05.2015.