

OPTIMALE STANDORTBESTIMMUNG DER FEUERWEHRHÄUSER DER STADT GÖTTINGEN



Bachelorarbeit in Mathematik
eingereicht an der Fakultät für Mathematik und Informatik
der Georg-August-Universität Göttingen
am 24. Oktober 2013

von

Joachim Vogt

Erstgutachter:

Jun.-Prof. Dr. Stephan Westphal

Zweitgutachterin:

Prof. Dr. Anita Schöbel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Der Feuerwehrbedarfsplan 2013	5
2.1	Die Feuerwehr der Stadt Göttingen	5
2.1.1	Die Berufsfeuerwehr	6
2.1.2	Die Freiwillige Feuerwehr	7
2.2	Einsatztaktik	8
2.3	Der Feuerwehrbedarfsplan 2013	11
3	Die Fragestellung	18
4	Mögliche Lösungsansätze	19
4.1	Weiszfeld Algorithmus	19
4.2	Fermat-Torricelli Punkt	19
4.3	Varignon'sches Gestell	19
5	Das Modell	21
5.1	Beispiel	21
5.2	Standortsuche bei der Feuerwehr	22
6	Vorgehensweise	26
6.1	Distanzmatrix	26
6.2	Risikowerte	26
6.3	Zeitanpassung	27
7	Ergebnisse und Auswertung	28
7.1	Erste Hilfsfrist	29
7.2	Zweite Hilfsfrist	39
7.2.1	Vier Minuten Anfahrtszeit	39
7.2.2	Neun Minuten Anfahrtszeit	55
8	Fehlerabschätzung	62
8.1	Untere Schranken der Durchschnittszeiten	66
9	Fazit	67

Abbildungsverzeichnis

1	Bergen, Retten, Löschen, Schützen	5
2	Standorte der Berufsfeuerwehr	6
3	Standorte der Freiwilligen Feuerwehr	7
4	Zeitfenster der Schutzzieldefinition der AGBF	9
5	Aufgaben 11 Funktionen des Löschzuges	11
6	Theoretisch errechnete Schutzzielerfüllung der Berufsfeuerwehr	12
7	Theoretisch errechnete Schutzzielerfüllung der Berufsfeuerwehr und Freiwilligen Feuerwehr Geismar	13
8	Grafisch dargestellte auswertbare Einsätze der Berufsfeuerwehr	14
9	Veränderungspotenzial bei den Ausrückebereichen der BF im West-Bereich . . .	15
10	Veränderungspotenzial bei den Ausrückebereichen der FF im Nord-Ost Bereich .	16
11	Veränderungspotenzial bei den Ausrückebereichen der BF und FwK im Nord-Ost Bereich	17
12	Das Varignon'sche Gestell	20
13	Gleichungssystem des Beispiels	22
14	Graphische Auswertung von Szenario 1	30
15	Graphische Auswertung von Szenario 2	31
16	Graphische Auswertung von Szenario 3	33
17	Graphische Auswertung von Szenario 4	34
18	Graphische Auswertung von Szenario 5	35
19	Graphische Auswertung von Szenario 6	37
20	Graphische Auswertung von Szenario 7	38
21	Graphische Auswertung von Szenario 8	40
22	Graphische Auswertung von Szenario 9	42
23	Graphische Auswertung von Szenario 10	43
24	Graphische Auswertung von Szenario 11	45
25	Graphische Auswertung von Szenario 12	47
26	Graphische Auswertung von Szenario 13	49
27	Graphische Auswertung von Szenario 14	50
28	Graphische Auswertung von Szenario 15	52
29	Graphische Auswertung von Szenario 16	54
30	Graphische Auswertung von Szenario 17	56
31	Graphische Auswertung von Szenario 18	57
32	Graphische Auswertung von Szenario 19, 20 und 21	59
33	X_{opt} , X_{opt}^* und weiterer Punkt als (mögliche) optimale Standorte in den Quadra- ten A und B	62
34	Optimaler Standort für einen Ortsteil	63

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

35	Optimaler Standort für mehrere Ortsteile	64
36	Bereiche fehlerhafter Abschätzung	65

1 Einleitung

„Wenn ich die Feuerwehr brauche, wie lange benötigt sie, um bei mir zu Hause anzukommen? Bin ich sicher?“ Diese oder ähnliche Fragen stellt sich sicherlich jeder einmal, so auch die Feuerwehr selbst. Dort wird in etwa folgendes gefragt: „Können wir den Brandschutz und die Hilfeleistung für jeden einzelnen Bürger der Gemeinde sicherstellen? Ist die Gemeinde sicher?“

Mit diesen Fragen beschäftigt sich aktuell die Feuerwehr der Stadt Göttingen. Im Rahmen eines regelmäßig zu erstellenden Feuerwehrbedarfsplanes sichtet die Feuerwehr die eigene Leistungsfähigkeit, sowohl der Berufsfeuerwehr, als auch der Freiwilligen Feuerwehr und die damit verbundene Qualität des Brandschutzes. Der Feuerwehrbedarfsplan 2013 ergab, dass der sogenannte Erreichungsgrad knapp 52% beträgt, gefordert sind aber mindestens 80%. Angestrebt werden sollten sogar Werte von 90% bis 95%. Das zwingt die Feuerwehr zum Handeln. Im Zuge des Feuerwehrbedarfsplanes 2013 wurden verschiedene Lösungen vorgestellt, die ich in dem nächsten Kapitel erläutern werde.

Unabhängig von den einzelnen Lösungsansätzen der Feuerwehr befasst sich diese Arbeit mit eigenen Lösungsansätzen, die sich den Mitteln der mathematischen Optimierung bedienen, um den Erreichungsgrad der Feuerwehr deutlich zu heben. Die konkrete Fragestellung wird im dritten Kapitel erläutert.

In der weiteren Arbeit stelle ich in Kapitel vier mögliche Lösungsansätze und in Kapitel fünf das tatsächlich verwendete Modell und den mathematischen Hintergrund vor. In Kapitel sechs beschreibe ich meine Vorgehensweise bei der Beschaffung der Daten, die für das Modell notwendig sind. Meine Ergebnisse aus dem Modell werden im darauffolgenden siebten Kapitel ausführlich aufgelistet, mit Grafiken visualisiert und ausgewertet. Darauf folgt in Kapitel acht eine Fehlerabschätzung der angewendeten Methodik. Diese Arbeit schließt mit einem Fazit in Kapitel neun.

2 Der Feuerwehrbedarfsplan 2013

In diesem Kapitel wird die Feuerwehr im Allgemeinen und die Feuerwehr der Stadt Göttingen im Besonderen beschrieben. Es wird auf den Feuerwehrbedarfsplan 2013 eingegangen, der mit seinem Ergebnis die Grundlage der Fragestellung und damit dieser gesamten Bachelorarbeit legt.

Im Wesentlichen sind die Aufgaben der Feuerwehr folgende:

- Brandschutz
- Hilfeleistung bei Notfällen und Naturereignissen
- Katastrophenschutz
- Beratung und Überprüfung von Gewerbe in Bezug auf Brandschutzeinrichtungen

Darüber hinaus hat die Feuerwehr Aufgaben im Rettungsdienst. (vgl. [5, S. 23f])



Abbildung 1: Bergen, Retten, Löschen, Schützen (Quelle: de.wikipedia.org, Artikel: Feuerwehr, Aufgerufen: 11.10.13)

2.1 Die Feuerwehr der Stadt Göttingen

Diese Aufgaben nimmt in der Stadt Göttingen eine Berufsfeuerwehr mit der Unterstützung der Freiwilligen Feuerwehr vor.

2.1.1 Die Berufsfeuerwehr

In Göttingen unterhält die Feuerwehr eine Hauptwache der Berufsfeuerwehr. Das ist die Feuerwache in der Breslauer Straße 10. Darüberhinaus wird eine, zum Klinikum gehörende Feuerwache durch Beamte der Berufsfeuerwehr Göttingen betrieben (Abbildung 2).

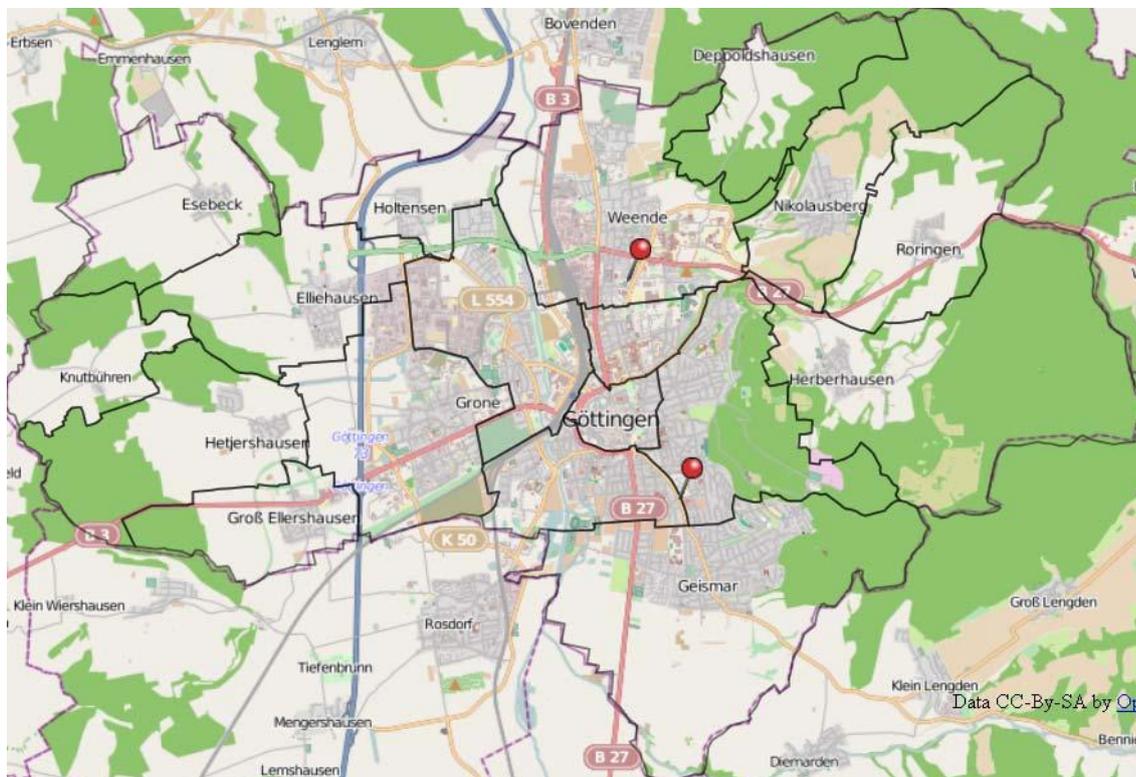


Abbildung 2: Standorte der Berufsfeuerwehr, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

Insgesamt stehen ca. 120 Einsatzkräfte für alle Aufgaben der Berufsfeuerwehr, inklusive Rettungsdienst, zur Verfügung. Die Einsatzkräfte verrichten in drei Schichten, den sogenannten Wachabteilungen, ihren Dienst. Dabei stehen täglich ca. 30 Einsatzkräfte in der Hauptwache zur Verfügung, in der Feuerwache am Klinikum sind es ca. 10. Die Einsatzkräfte der Feuerwache Klinikum sind vertraglich für das Klinikum zuständig. Sollten die Einsatzkräfte aber an anderer Stelle gebraucht werden, gibt es die Möglichkeit ein Hilfeleistungslöschfahrzeug mit vier Einsatzkräften in den Einsatz zu entsenden. Eine Schicht ist immer 24 Stunden lang und gliedert sich in Arbeitsdienst, Ausbildung, Dienstsport und Bereitschaftsdienst. Die diensthabenden Einsatzkräfte sind für die unterschiedlichsten Aufgaben eingeteilt. Es sind jederzeit drei Rettungswagen (davon einer am Klinikum und zwei an der Hauptwache) und zwei Notarzteinsatzfahrzeuge (davon eins am Klinikum und eins an der Hauptwache), die Leitstelle (je nach Tageszeit mit drei bis fünf Einsatzkräften), der Löschzug (mit elf Einsatzkräften) und Sonderfahrzeuge (mit zwei Einsatzkräften) besetzt.

Der Berufsfeuerwehr Göttingen stehen folgende Sonderfahrzeuge zur Verfügung:

- Tanklöschfahrzeuge TLF 24/40-750 und TLF 8W

- Rüstwagen
- Gerätewagen Gefahrgut und Atemschutz/Strahlenschutz
- Gerätewagen Naschschub und Logistik
- Kleinalarmfahrzeug
- Wechselladerfahrzeug

(vgl. [5, S. 24ff])

2.1.2 Die Freiwillige Feuerwehr

Neben der Berufsfeuerwehr unterhält die Stadt Göttingen noch 13 Ortsfeuerwehren in den Stadtteilen Elliehausen, Esebeck, Geismar, Grone, Groß Ellershausen, Herberhausen, Hetjershausen, Holtensen, Knutbühren, Nikolausberg, Roringen, Stadtmitte und Weende (Abbildung 3).

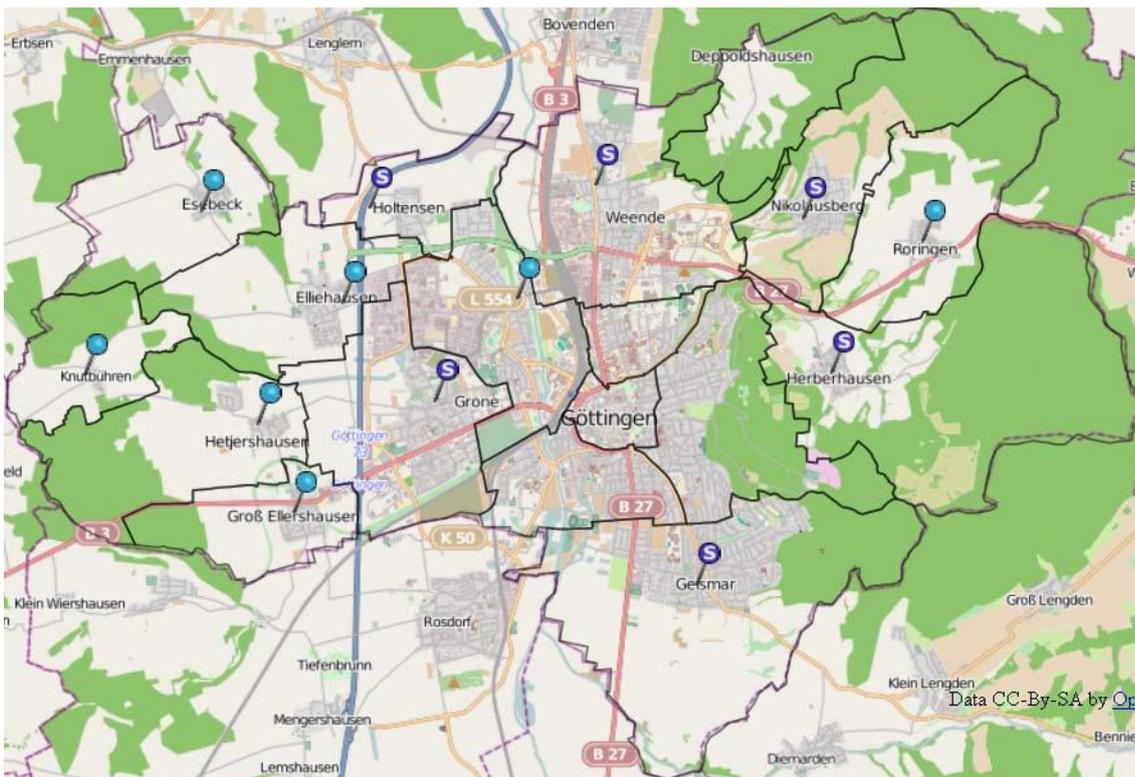


Abbildung 3: Standorte der Freiwilligen Feuerwehr, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

In jeder dieser Ortsfeuerwehren gibt es 13 bis 50 aktive Mitglieder. Insgesamt hat die Freiwillige Feuerwehr in der Stadt Göttingen 385 aktive Mitglieder, 152 Mitglieder in der Jugendfeuerwehr und 76 Mitglieder in der Kinderfeuerwehr (Stand Oktober 2012). Jede Ortsfeuerwehr hält als Mindestausstattung ein Löschgruppenfahrzeug vor. Die Ausstattung der jeweiligen

Ortsfeuerwehr richtet sich darüber hinaus nach der Größe und den Sonderaufgaben, die diese Feuerwehr wahrnimmt. Zu den Sonderaufgaben gehören:

- Gefahrstoffzug
- Technische Hilfeleistung
- Verpflegung
- Waldbrandzug
- Fernmeldedienst

(vgl. [5, S. 27ff])

2.2 Einsatztaktik

Wird die Feuerwehr zu einem Brand alarmiert, spielt die Zeit immer eine große Rolle. Für die Zeit, die maximal vergangen sein darf, bis eine bestimmte Anzahl an Einsatzkräften vor Ort sein muss, ist die Orbit-Studie als geltender Stand der Technik maßgebend:

„Bei Wohnungsbränden ist die Rauchgasintoxikation („Rauchvergiftung“) die häufigste Todesursache. Die maximale Dauer, die ein Mensch in Brandrauch überleben kann, ist sicherlich von zahlreichen Faktoren abhängig. Diese Faktoren sind beispielsweise die tatsächlichen Konzentrationen der wesentlichen Brandgase (Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Blausäure,...), die Atemfrequenz und die physische Konstitution der betroffenen Person. Die Überlebensdauer eines Menschen bestimmt aber wesentlich die Zeit, in der die Feuerwehr eine hilflose Person spätestens gerettet haben muss.“
[7, S. 13]

„In einer wissenschaftlichen Untersuchung (Orbit-Studie) wurde in den siebziger Jahren die sogenannte Reanimationsgrenze bei Rauchgasintoxikationen erforscht. Mit jedem Atemzug eines Menschen im Brandrauch steigt der Kohlenmonoxid-Gehalt im Blut weiter an. Gemäß der Orbit-Studie liegt die Reanimationsgrenze für Rauchgasintoxikationen bei etwa 17 Minuten nach Brandausbruch. Nach dieser Zeit ist eine erfolgreiche Reanimation weitestgehend ausgeschlossen. Nach diesem Modell muss die Feuerwehr also eine im Brandrauch liegende Person spätestens 17 Minuten nach Brandausbruch ins Freie verbracht und an den Rettungsdienst übergeben haben.“ [7, S. 13]

Die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) empfiehlt daher folgende Einsatztaktik:

„Der Feuerwehreinsatz ist nach wie vor personalintensiv. So müssen zur Menschenrettung und zur Brandbekämpfung beim „Kritischen Wohnungsbrand“ mindestens 16 Einsatzfunktionen zur Verfügung stehen. Diese 16 Einsatzfunktionen können als eine Einheit oder durch Addition mehrerer Einheiten dargestellt werden. Die Kombination von Berufs- und Freiwilliger Feuerwehr ist möglich. Sofern die Einheiten nicht gleichzeitig eintreffen, kann man mit zumindest 10 Funktionen in der Regel nur die Menschenrettung unter vorübergehender Vernachlässigung der Eigensicherung einleiten. Um die Menschenrettung noch rechtzeitig durchführen zu können, sind beim kritischen Wohnungsbrand die ersten 10 Funktionen innerhalb von 8 Minuten nach Alarmierung erforderlich. Nach weiteren 5 Minuten, also 13 Minuten nach Alarmierung, müssen vor einem möglichen Flash-Over mindestens 16 Funktionen vor Ort sein. Diese weiteren 6 Funktionen sind zur Unterstützung bei der Menschenrettung, zur Brandbekämpfung, zur Entrauchung sowie zur Eigensicherung der Einsatzkräfte erforderlich. Die Aufgaben der Funktionen richten sich nach den örtlichen Festlegungen. Nach örtlichen Gegebenheiten und der Risikobetrachtung sind gegebenenfalls die Funktionszahlen zu erhöhen und die Zeitwerte zu reduzieren.“ [7, S. 14]



Abbildung 4: Zeitfenster der Schutzzieldefinition der AGBF, (Quelle: AGBF, Stand Oktober 2012)

Der Zeitpunkt, an dem die ersten Funktionen eingetroffen sein sollen, nennt man 1. Hilfsfrist, den Zeitpunkt, an dem die restlichen Funktionen eingetroffen sein sollen, 2. Hilfsfrist. Die Hilfsfrist setzt sich zusammen aus Dispositionszeit, Ausrückzeit und Anfahrtszeit.

Die Feuerwehr Göttingen schickt statt der geforderten 16 Funktionen 17 Funktionen an die Einsatzstelle, davon elf in der 1. Hilfsfrist, die restlichen sechs in der 2. Hilfsfrist. Die elf Funktionen der 1. Hilfsfrist sind ein zusammengehöriger Löschzug und sollen nach Möglichkeit immer durch die Berufsfeuerwehr gestellt werden. In der Graphik ist zu erkennen, dass die AGBF damit rechnet, dass die Berufsfeuerwehr nach einer Minute bereit ist zum Einsatz auszurücken. Die Feuerwehr Göttingen setzt hier 1,5 Minuten an. Damit werden für die Anfahrtszeit zur

Einsatzstelle 6,5 Minuten angesetzt. Die sechs Funktionen der 2. Hilfsfrist können von der Freiwilligen Feuerwehr übernommen werden. Zusätzlich wird noch eine übergeordnete Einsatzleitung bestehend aus zwei Einsatzkräften zur Einsatzstelle entsandt, da hier Einsatzkräfte aus zwei verschiedenen Einheiten zusammenarbeiten. (vgl. [5, S. 13])

Eine Funktion wird immer von einer Einsatzkraft wahrgenommen.

Folgende Übersicht zeigt, welche Funktion welche Aufgabe auf welchem Einsatzfahrzeug im Brandfall übernimmt (Abbildung 5):

1. Hilfsfrist:

- Besatzung ZUG-ELW (Einsatzleitwagen)
 - Einsatzleiter: Leitung des Einsatzes
 - Führungsassistent: Kommunikation mit der Feuerwehreinsatzleitstelle
- Besatzung HLF 1 (Hilfeleistungslöschgruppenfahrzeug)
 - Maschinist: Überwacht und dokumentiert den Atemschutzeinsatz
 - Angriffstrupp HLF 1: Menschenrettung und Brandbekämpfung (3 Personen)
- Besatzung DLK (Drehleiter)
 - Maschinist DLK: Bedient die Drehleiter
 - Fahrzeugführer DLK: Stellt den zweiten Rettungsweg sicher
- Besatzung HLF 2
 - Maschinist: Bedient die Pumpe und Aggregate
 - Angriffstrupp HLF 2: Wasserversorgung, dann Einsatzbereitschaft als Sicherheitstrupp (2 Personen)

2. Hilfsfrist:

- Besatzung LF 10/6 (Löschgruppenfahrzeug)
 - Staffelführer: Erhält Befehle und leitet den Einsatz seiner Staffel
 - Maschinist: Atemschutzüberwachung
 - Angriffstrupp LF: Angriffstrupp (2 Personen)
 - Sicherheitstrupp LF: Verlegen von Schlauchleitungen, Aufbau von Be- und Entlüftungsgeräten (2 Personen)

Gefordert ist nun, dass für mindestens 80%, optimalerweise 90 bis 95% der Bewohner Göttingens die 1. und 2. Hilfsfrist eingehalten werden kann, dass also der sogenannte Erreichungsgrad bei mindestens 80%, optimalerweise bei 90 bis 95% liegt. (vgl. [5, S. 60])

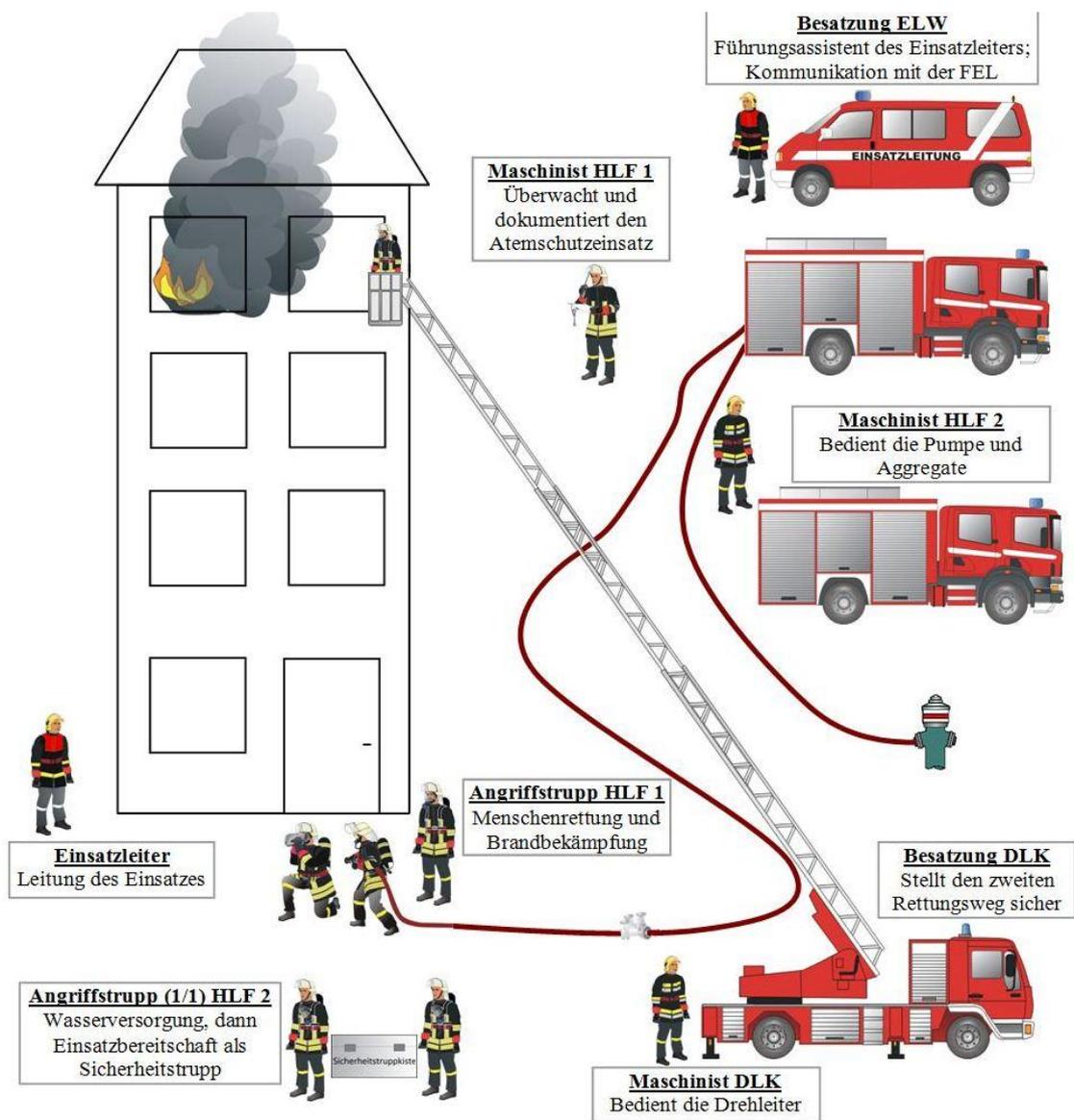


Abbildung 5: Aufgaben 11 Funktionen des Löschzuges, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

2.3 Der Feuerwehrbedarfsplan 2013

Der Feuerwehrbedarfsplan 2013 überprüft die Hilfsfristen dabei auf folgende Weise:

„Die Ermittlung der Einhaltung der Schutzziele wurde in drei verschiedenen Stufen durchgeführt. Bei der Ermittlung der ersten Stufe wird anhand von theoretischen Fahrzeitberechnungen überprüft, wo im Stadtgebiet die definierten Schutzziele erreicht werden. Da diese Auswertung immer eine Mittelung über ein geographisches Gebiet darstellt, wird zusätzlich eine zweite bzw. dritte Stufe zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Feuerwehr Göttingen dargestellt. In Stufe zwei wird jeder auswertbare Einsatz als Punkt auf der Stadtkarte dargestellt. Diese Art der Darstellung ermöglicht die Verifizierung der theoretisch ermittelten Fahrzeiten aus der er-

sten Stufe. In Stufe drei findet die Ermittlung des prozentualen Erreichungsgrades bei den auswertbaren Einsätzen für die definierten Schutzziele statt.“ [5, S. 78]

Dazu wird die Internetseite www.openstreetmap.de herangezogen. Diese Seite erlaubt es Durchschnittsgeschwindigkeiten festzulegen. Als bundesweite Standardwerte für Alarmfahrten der Feuerwehr gelten 40 km/h in geschlossenen Ortschaften, 60 km/h auf Bundes- und Landstraßen und 80 km/h auf Bundesautobahnen. www.openstreetmap.de fertigt um einen vorgegebenen Punkt ein Polygon, das in einer vorgegebenen Zeit in der Durchschnittsgeschwindigkeit erreicht werden kann.

Wie oben beschrieben soll die 1. Hilfsfrist von der Berufsfeuerwehr allein erreicht werden. Die Feuerwache am Klinikum stellt dafür nicht genügend Einsatzkräfte und Einsatzfahrzeuge zur Verfügung, also kann hier nur die Feuerwache in der Breslauer Straße betrachtet werden. Das ergibt folgendes Polygon:

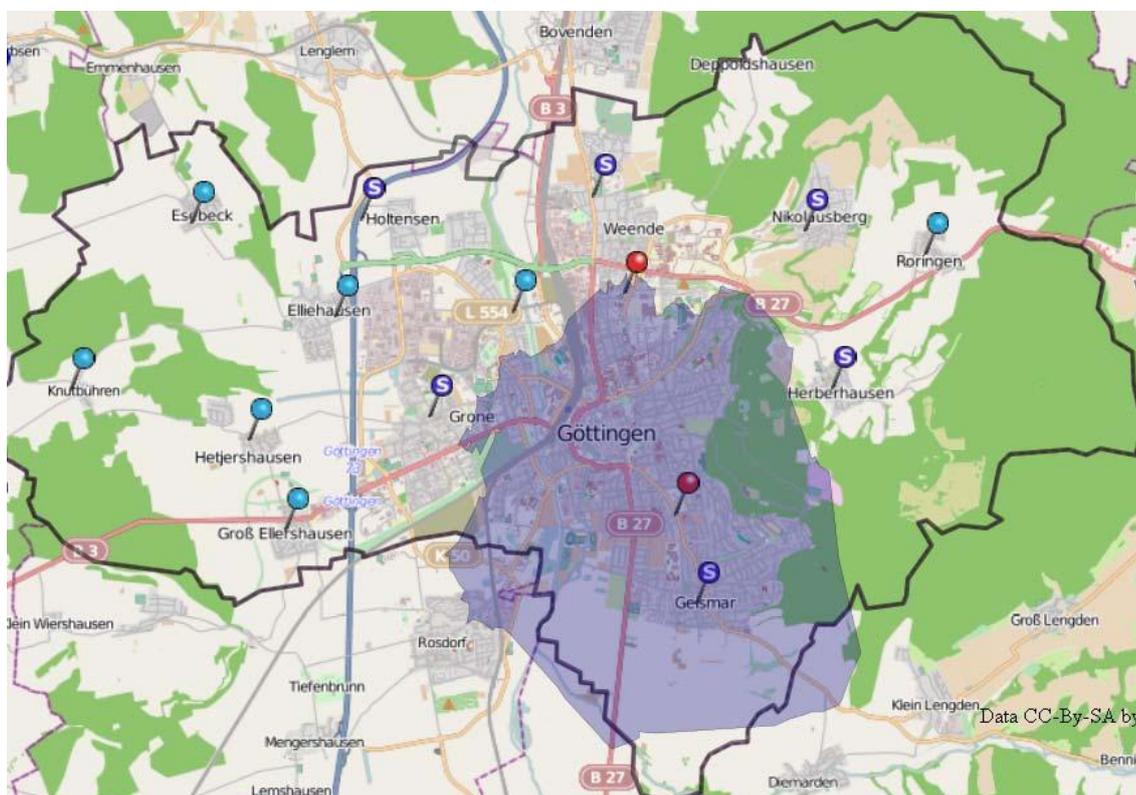


Abbildung 6: Theoretisch errechnete Schutzzielbefreiung der Berufsfeuerwehr, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

„Das zweite Schutzziel (weitere sechs Funktionen in 13 Minuten) kann nur mit Hilfe der Ortsfeuerwehr Geismar erfüllt werden. Nur in dem Bereich, in dem sich beide Polygone (Berufsfeuerwehr und Ortsfeuerwehr Geismar) überschneiden, sind beide Schutzziele erreicht. Somit werden auch die nach AGBF „kritischer Wohnungsbrand“ geforderten Funktionen und Zeiten eingehalten.“ [5, S. 80]

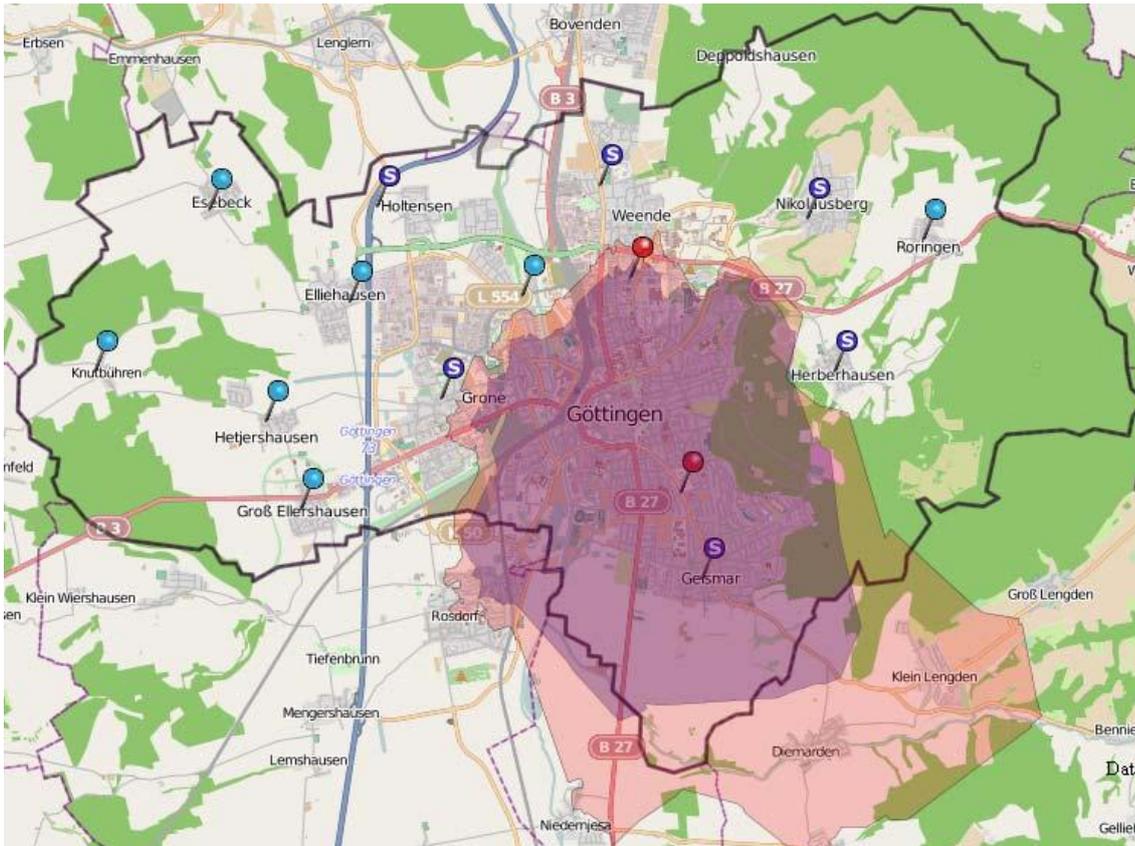


Abbildung 7: Theoretisch errechnete Schutzzieleerfüllung der Berufsfeuerwehr und Freiwilligen Feuerwehr Geismar, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

Für diese Berechnung wurde ein bundesweiter Standardwert von neun Minuten als Anfahrtzeit zu Grunde gelegt. Eine Selbsteinschätzung der Freiwilligen Feuerwehren zeigt, dass die Feuerwehr Geismar sich selbst als so leistungsstark einschätzt, dass vier Minuten nach Alarm sechs Einsatzkräfte, davon vier mit der Qualifikation Atemschutzgeräteträger, im Feuerwehrgerätehaus bereit zum Ausrücken zum Einsatzort stehen. In der Selbsteinschätzung gibt es sowohl von Ortsfeuerwehr zu Ortsfeuerwehr, als auch von Wochentag zu Wochenende und von tagsüber zu nachts Unterschiede. Außerdem wurde zu den neun Minuten Anfahrtszeit und vier Minuten Ausrückzeit auch vier Minuten für die Anfahrt zum Einsatz und neun Minuten für das Eintreffen in der Wache abgefragt. Hier schätzen sich die meisten Ortsfeuerwehren wesentlich leistungsfähiger ein, daher wurde für jede Freiwillige Feuerwehr ein Vier-Minuten-Polygon mit www.openstreetmap.de erzeugt, um den Erreichungsgrad der 2. Hilfsfrist zu bestimmen. Dabei wurde in drei Klassen aufgeteilt (vgl. [5, S. 78ff]):

- Grundausstattung mit mindestens einem Löschgruppenfahrzeug (Knutbühen, Groß Ellershausen, Eisebeck, Stadtmitte, Roringen)
- Grundausstattung mit mindestens einem Löschgruppenfahrzeug und einem Rüstwagen (Elliehausen, Hetjershausen)

- Stützpunktfeuerwehren mit größerer Ausstattung (Herberhausen, Geismar, Grone, Weende, Nikolausberg, Holtensen)

Zur Überprüfung der Korrektheit der Arbeit wurden Einsätze betrachtet, bei denen die 1. Hilfsfrist eingehalten wurde. In Abbildung 8 lässt sich erkennen, dass die Punkte mit dem errechneten Polygon größtenteils übereinstimmen. Abweichungen ergeben sich durch Einsatzbeginn am Tag oder in der Nacht, hohes Verkehrsaufkommen wegen Berufsverkehr, Baustellen und Anfahrten direkt von einem vorhergehenden Einsatz.

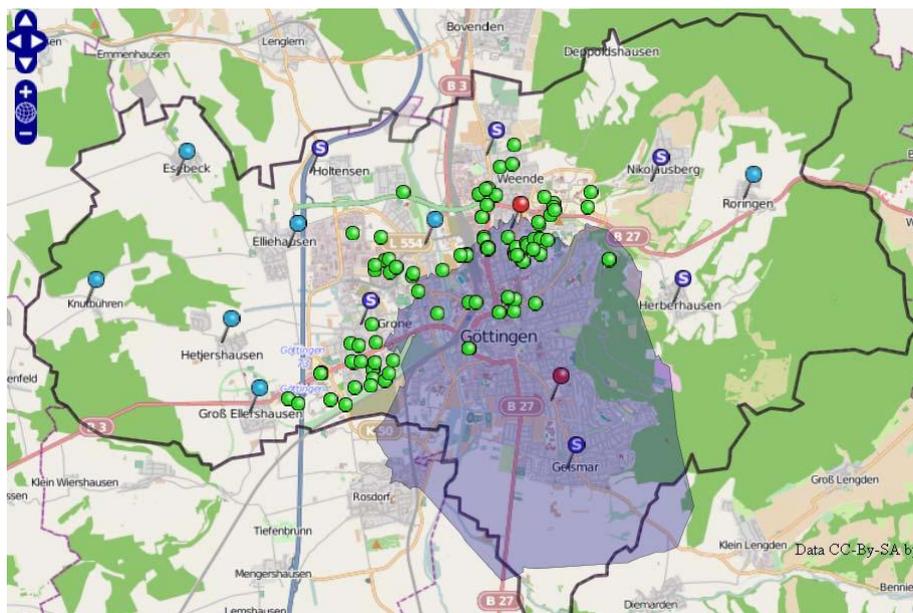


Abbildung 8: Grafisch dargestellte auswertbare Einsätze der Berufsfeuerwehr, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

Aus diesen Erkenntnissen beschreibt der Feuerwehrbedarfsplan 2013 folgendes als Ist-Zustand:

- Das erste Schutzziel (elf Funktionen in acht Minuten) kann nur im Südbereich der Stadt Göttingen (Abbildung 6) erfüllt werden.
- Das zweite Schutzziel (sechs Funktionen in 13 Minuten) kann von sieben Ortsfeuerwehren am Tag und zwölf Ortsfeuerwehren in der Nacht erfüllt werden.
- Das erste und zweite Schutzziel kann im Südbereich der Stadt Göttingen durch die Feuerwache Breslauer Straße und die Ortsfeuerwehr Geismar jederzeit erfüllt werden (Abbildung 7).
- Im Westen und im Nord-Osten der Stadt kann das erste und zweite Schutzziel tagsüber nicht erfüllt werden.

Die Erfüllung des zweiten Schutzziels wird dabei vor allem durch die Selbsteinschätzung der Freiwilligen Feuerwehren bestimmt. (vgl. [5] S. 81ff)

Um die Analyse abzuschließen betrachtet der Feuerwehrbedarfsplan 2013 die realen Einsatzzeiten. Diese werden automatisch auf dem Einsatzleitrechner gespeichert. Durch Störungen im Funk oder zu frühes oder spätes Drücken der Statustasten im Einsatzfahrzeug sind ca. 75% der gespeicherten Einsatzzeiten für die Analyse des Feuerwehrbedarfsplanes 2013 verwertbar. Der Zeitraum der analysierten Daten erstreckt sich über die Jahre 2009 bis 2011. (vgl. [5, S. 86ff])

Die Analyse ergibt:

- Der Erreichungsgrad für das 1. Schutzziel liegt bei ca. 52%.
- Der Erreichungsgrad für das 2. Schutzziel liegt bei ca. 85%.

Als Lösung schlägt der Feuerwehrbedarfsplan 2013 verschiedene Veränderungen vor. Für die Schutzziele im Westbereich wird folgendes vorgeschlagen:

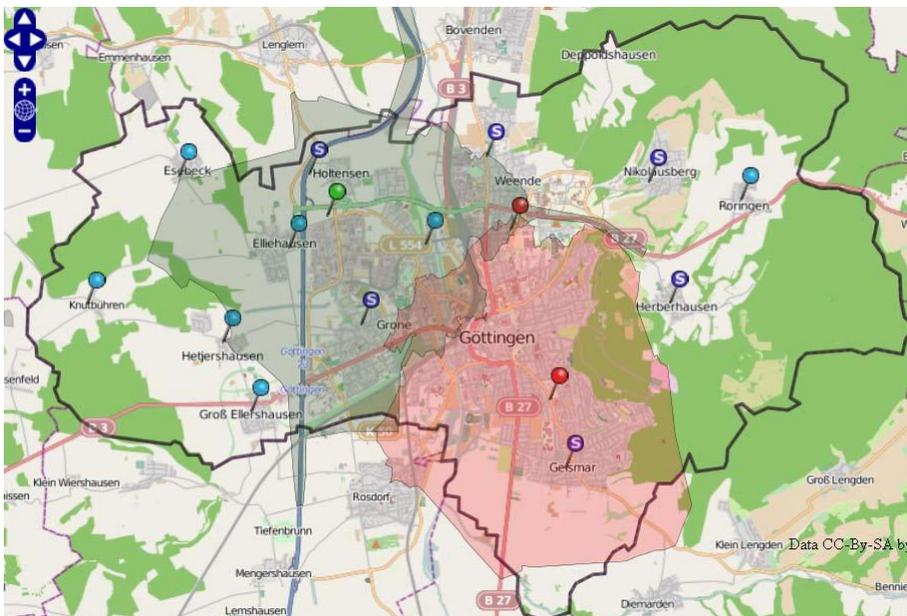


Abbildung 9: Veränderungspotenzial bei den Ausrückebereichen der BF im West-Bereich, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

„Um die Schutzziele im West-Bereich der Stadt Göttingen zukünftig zu erfüllen, ist der Bau einer neuen Feuerwache im Bereich nördlich der Hermann-Kolbe Straße notwendig (siehe grüne Nadel). Diese Feuerwache muss tagsüber mit elf Funktionen (Löschzug) besetzt werden. Nachts hingegen werden nur zwei Funktionen (Drehleiter) benötigt. Grund dafür ist, dass nachts die Ortsfeuerwehren Grone, Holtensen und Elliehausen im West-Bereich der Stadt das erste Schutzziel erfüllen können. Zusätzlich sollte diese Feuerwache auch als Aus- und Fortbildungszentrum für die Feuerwehr Göttingen ausgebaut werden. Anhand der farbigen Polygone auf der nachfolgenden Abbildung ist zu erkennen, dass mit dem Bau der Feuerwache im West-

Bereich und dem jetzigen Standort in der Breslauer Straße die Schutzziele im West- und Südbereich der Stadt erfüllt werden können.“ [5, S. 91]

Für die Schutzziele im Nordbereich gibt es sogar drei verschiedene vorgeschlagene Lösungen:

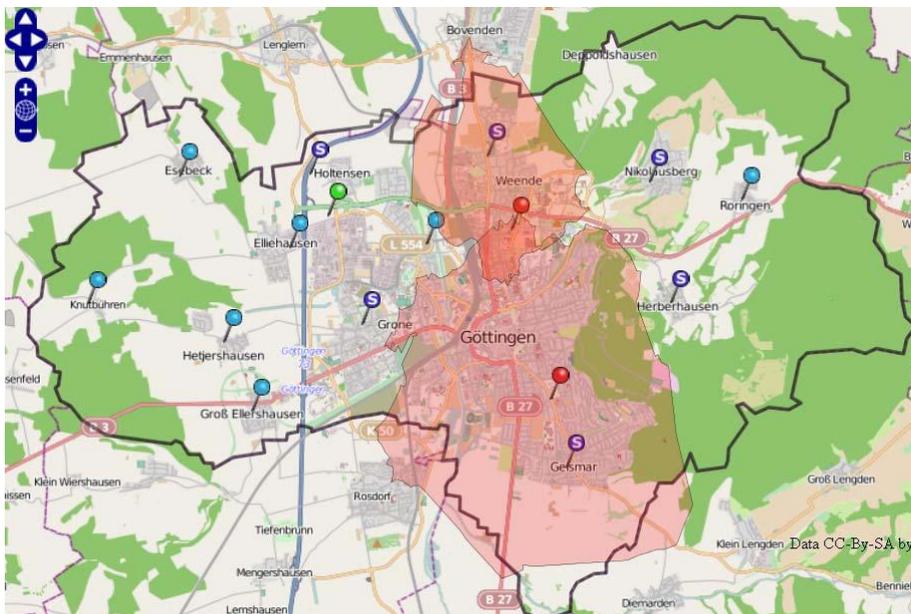


Abbildung 10: Veränderungspotenzial bei den Ausrückebereichen der FF im Nord-Ost Bereich, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

„Um die Schutzziele im Nord-Ost Bereich der Stadt zu erfüllen, besteht die Möglichkeit, am bestehenden Standort der Ortsfeuerwehr Weende eine Doppelmitgliedschaft mit den Mitgliedern aus anderen Ortsfeuerwehren zu realisieren. Dies würde bedeuten, dass Mitglieder anderer Ortsfeuerwehren im Einsatzfall der Feuerwehr Weende werktags zusätzlich zur Verfügung ständen. Das ist aber nur möglich, wenn der Arbeitsplatz der Mitglieder anderer Ortsfeuerwehren in unmittelbarer Reichweite zur Ortsfeuerwehr Weende ist. Allerdings müsste ein solches Mitglied im Falle einer Doppelmitgliedschaft eine zusätzliche Einsatzrüstung bekommen sowie an den Aus- und Fortbildungen der Ortsfeuerwehr Weende teilnehmen. Eine Befragung aller Mitglieder der Freiwilligen Feuerwehr hat ergeben, dass einige Mitglieder unter den oben genannten Voraussetzungen bereit wären, eine solche Doppelmitgliedschaft in der Ortsfeuerwehr Weende einzugehen. Durch die Möglichkeit der Doppelmitgliedschaft in der Ortsfeuerwehr Weende und den daraus resultierenden zusätzlichen Funktionen ist es möglich, die Schutzziele im Nord-Ost Bereich teilweise zu erfüllen. Anhand der farbigen Polygone auf der nachfolgenden Abbildung ist zu erkennen, dass der Nord-Ost Bereich mit dem Standort Weende fast abgedeckt wäre. Die Ortsteile Nikolausberg, Roringen, Herberhausen sowie das Max-Planck-Institut am Fassberg werden in den vorgegebenen Hilfsfristen jedoch nicht erreicht.“ [5, S. 92]

„Die zweite Möglichkeit zur Erfüllung der Schutzziele im Nord-Ost Bereich wäre der Bau einer zusätzlichen Feuerwache mit hauptamtlichen Kräften im Bereich Weende. Allerdings müsste diese Feuerwache nur tagsüber mit elf Funktionen (Löschzug) besetzt werden, da die umliegenden Freiwilligen Feuerwehren nachts die geforderten Schutzziele erfüllen können. Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit eines Neubaus für die Ortsfeuerwehr Weende, wäre eine gemeinsame räumliche Lösung sowohl für die hauptamtlichen Einsatzkräfte als auch für die Freiwillige Feuerwehr durchaus denkbar.“ [5, S. 93]

„Eine weitere Lösung für den Nord-West Bereich wäre, dass auf der Feuerwache Klinikum sieben zusätzliche Funktionen stationiert werden. Dazu wären allerdings zwischen der Stadt Göttingen und der Universitätsmedizin Göttingen (UMG) zusätzliche vertragliche Regelungen nötig. Auch müsste dafür eine bauliche Erweiterung der Feuerwache Klinikum erfolgen.“ [5, S. 93]

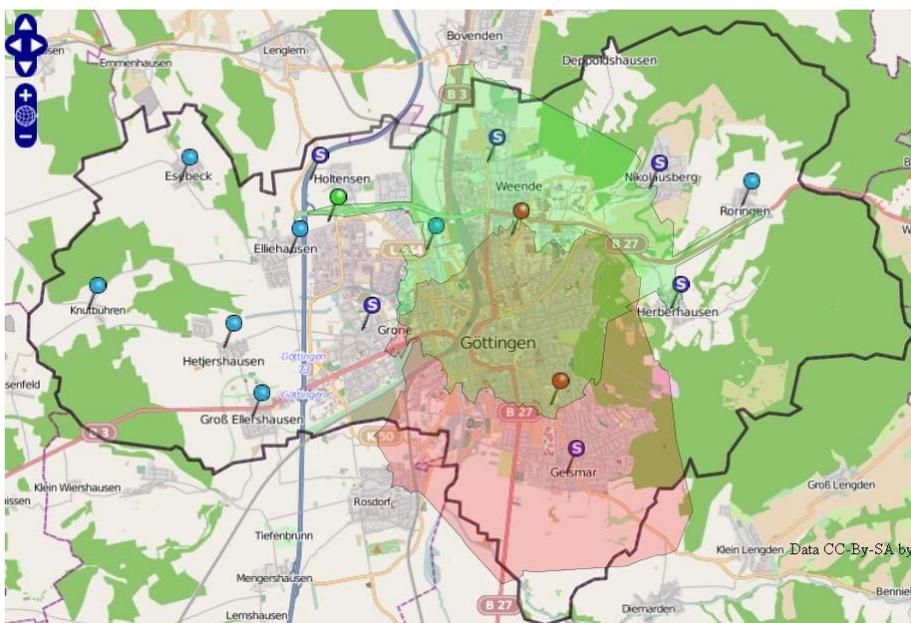


Abbildung 11: Veränderungspotenzial bei den Ausrückebereichen der BF und FwK im Nord-Ost Bereich, (Quelle: Stadt Göttingen, Fachbereich Feuerwehr, Fachdienst Information und Kommunikation, Stand Oktober 2012)

3 Die Fragestellung

Bei der Erstellung des Feuerwehrbedarfsplans 2013 wurde, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, festgestellt, dass es vor allem im Bereich der Berufsfeuerwehr einen Handlungsbedarf gibt, da ein Erreichungsgrad von 52% in der 1. Hilfsfrist ein viel zu geringer Wert ist. Die Feuerwehr hat ein paar Lösungsvorschläge präsentiert, die unter Berücksichtigung der realen Möglichkeiten (personelle Leistungsfähigkeit der Freiwilligen Feuerwehr, Vorhandensein von bebaubarem Grundstücken, Personalerweiterung der Berufsfeuerwehr) erarbeitet wurden.

In dieser Bachelorarbeit soll dieses Problem mathematisch-wissenschaftlich betrachtet werden. Dabei soll, wie im Feuerwehrbedarfsplan 2013 beschrieben, im ersten Schritt die Abdeckung Göttingens durch die Berufsfeuerwehr, im zweiten Schritt durch die Freiwillige Feuerwehr optimiert werden. Bei der Berufsfeuerwehr ist dabei die bestehende Wache in der Breslauer Straße als gegeben zu sehen. Zusätzlich ist mindestens ein Standort einer neuen Wache für die Berufsfeuerwehr zu ermitteln. Außerdem sind die Lösungsvorschläge der Feuerwehr zu überprüfen.

Bei der Freiwilligen Feuerwehr stellen sich die folgenden Fragen:

- Wie sieht die optimale Verteilung der Feuerwehrhäuser aus, wenn man annimmt, dass es noch keine Freiwillige Feuerwehr gibt und diese von Null geplant werden könnte?
- Was passiert, wenn man verschiedene Feuerwehrhäuser als gegeben ansieht und die restlichen Feuerwehrhäuser neu baut?
- Reicht eine Teilmenge der bestehenden Feuerwehrhäuser aus, um die zweite Hilfsfrist zu sichern?

Dabei sind die Ergebnisse auch von der Anfahrtzeit abhängig. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, beträgt der Standardwert für die Anfahrtzeit neun Minuten. Das heißt, dass die Einsatzfahrzeuge spätestens vier Minuten nach Alarmierung ausrücken, um 13 Minuten nach Alarm vor Ort zu sein. Realistischer ist allerdings eine Ausrückezeit von neun Minuten und eine Anfahrtzeit von vier Minuten. Beides muss betrachtet werden.

Ziel ist es ein Szenario für das Betreiben bestimmter Standorte mit einer Maßeinheit zu versehen, die einen direkten Vergleich ermöglicht.

4 Mögliche Lösungsansätze

Es handelt sich um ein Problem der Standortsuche. Es sind Einsatzorte gegeben, die optimal von Standorten der Feuerwehr bedient werden sollen.

4.1 Weiszfeld Algorithmus

Der ungarische Mathematiker Endre Vasznyi Weiszfeld formulierte 1936 einen Algorithmus um dieses Problem zu lösen. Dazu wird eine beliebige Metrik benötigt, die den Einsatzorten die Entfernung zu den möglichen Standorten der Feuerwehr zuordnet. Es ist sogar möglich die jeweiligen Entfernungen zu gewichten. Dem Algorithmus von Weiszfeld liegt zu Grunde, dass als Optimalitätsbedingung die partiellen Ableitungen gleich Null gesetzt werden. (vgl. [6, 3, 2, 8])

Dieser Algorithmus bestimmt lediglich einen optimalen Standort und ist somit für diese Arbeit nicht geeignet.

4.2 Fermat-Torricelli Punkt

Der französische Mathematiker Pierre de Fermat stellte eine Anleitung auf, mit der man zu drei Eckpunkten eines Dreiecks A (die Einsatzorte) einen Punkt bekommt, der zu allen drei Punkten die gleiche Entfernung hat. Dazu legt man an die Seiten des Dreiecks A gleichseitige Dreiecke. Diese gleichseitigen Dreiecke haben eine Seite und zwei Eckpunkte mit Dreieck A gemeinsam. Verbindet man nun die freien Eckpunkte der neuen Dreiecke mit dem jeweils freien Eckpunkt von A, so erhält man drei Geraden. Diese Geraden schneiden sich in einem Punkt. Dieser Punkt ist der Fermat-Torricelli Punkt, der zu allen den Eckpunkten von Dreieck A die gleiche Entfernung aufweist. (vgl. [12, 8])

Dieser Algorithmus bestimmt lediglich optimale Standorte für drei Punkte. Für diese Arbeit reicht das nicht aus.

4.3 Varignon'sches Gestell

Der französische Mathematiker Pierre de Varignon löst dieses Problem mechanisch. Er nimmt eine Ebene, zum Beispiel einen Tisch, und schneidet Löcher an die Stellen, an denen die Einsatzorte zu finden sind. Durch jedes Loch kommt ein Faden. Alle Fäden werden auf dem Tisch zu einem großen Knoten verknotet. An das lose Ende jedes Fadens werden unter dem Tisch Gewichte gebunden. Sollen die Einsatzorte verschieden stark gewichtet werden, müssen nur die Gewichte an den Fäden entsprechend angepasst werden. Die Gewichte ziehen die Fäden nach unten und verschieben dadurch den Knoten, mit dem die Fäden verbunden sind. Da wo der Knoten zur Ruhe kommt, befindet sich der optimale Standort. (vgl. [10, 2, 8])

Dieses Verfahren ist ebenfalls für diese Arbeit ungeeignet, da die Fläche, die benötigt werden würde, sehr groß sein müsste, um einen genauen optimalen Standort genau zu bestimmen.

Darüberhinaus wird immer nur ein Standort bestimmt. In dieser Arbeit sollen aber mehrere Standorte bestimmt werden.

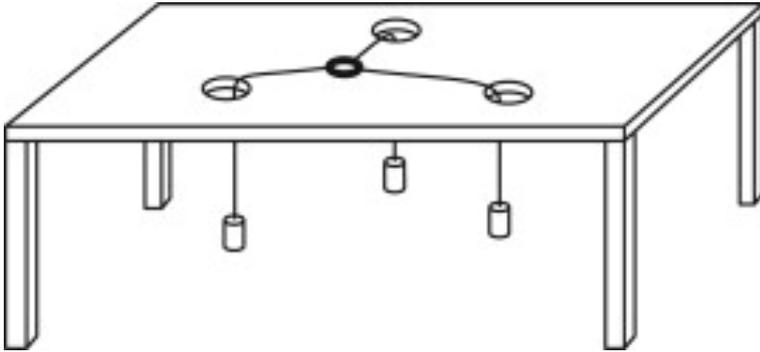


Abbildung 12: Das Varignon'sche Gestell, (Quelle: <http://jniemuth.hubns.net/gis520/files/20-13/01/Varignon-Frame.jpg>, Aufgerufen: 22.10.13)

5 Das Modell

Im Folgenden wird näher auf die lineare Optimierung eingegangen. Dies ist wichtig, da sie das mathematische Mittel zur Lösung der Suche nach dem besten Standpunkt für die Feuerwehrhäuser darstellt.

In der linearen Optimierung betrachtet man Ungleichungssysteme der Form

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x \\ & Ax \geq b \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

Dabei ist A eine Matrix mit $A \in \mathbb{R}^{m,n}$, b , c und x sind Vektoren mit $b \in \mathbb{R}^m$ und $c, x \in \mathbb{R}^n$. Ziel dieses Ungleichungssystems ist es einen Vektor x zu finden, der die sogenannte Zielfunktion (erste Zeile) unter den gegebenen Nebenbedingungen (zweite und dritte Zeile) maximiert. (vgl. [11])

5.1 Beispiel

Man hat Rezepte für einen Haselnuss- und einen Zitronenkuchen und möchte auf einer Veranstaltung die Kuchen möglichst gewinnbringend verkaufen. Es ist bekannt, wie viel Einheiten der Zutaten vorhanden sind, wie viele Einheiten der Zutat pro Kuchen benötigt werden und wie viel Gewinn der Kuchen bringt.

ZUTATEN	HASELNUSS	ZITRONE	VORRAT
Mehl	0.40	0.25	30
Zucker	0.20	0.30	25
Milch	0.25	0.15	100
Haselnüsse	0.15	0.00	10
Zitronenmischung	0.40	0.30	20
Gewinn/Kuchen	7 Euro	3 Euro	

Das Ziel ist, dass $7 \cdot x + 3 \cdot y$ einen maximalen Wert annimmt. Dabei ist x die Anzahl der Haselnusskuchen und y die Anzahl der Zitronenkuchen. Darüber hinaus werden Nebenbedingungen aufgestellt. Zum Beispiel für die erste Zeile: $0.4 \cdot x + 0.25 \cdot y \leq 30$. Da nur 30 Einheiten Mehl vorhanden sind, muss die Anzahl der Zitronen- und Haselnusskuchen so gewählt werden, dass der entsprechende Mehlverbrauch 30 Einheiten Mehl nicht überschreitet. Die restlichen Zeilen sind analog in Nebenbedingungen umzuformen.

Zusätzlich müssen Aussagen über die Variablen x und y getroffen werden. Bei diesem Beispiel müssen die Kuchenanzahlen mindestens Null sein. Es ist allerdings möglich Teile von Kuchen zu backen, daher muss $x \geq 0$ und $y \geq 0$ gewählt werden.

Das führt zu folgendem Gleichungssystem (vgl. [9]):

$$\begin{array}{rcll}
R_1 : & 0.40x & + & 0.25y \leq 30 \\
R_2 : & 0.20x & + & 0.30y \leq 25 \\
R_3 : & 0.25x & + & 0.15y \leq 100 \\
R_4 : & 0.15x & & \leq 10 \\
R_5 : & & & 0.30y \leq 20 \\
R_6 : & x & & \geq 0 \\
R_7 : & & & y \geq 0 \\
Z : & 7x & + & 3y = \max
\end{array}$$

Abbildung 13: Gleichungssystem des Beispiels, (Quelle: www.mathematik.de, Aufgerufen: 08.08.13)

Dieses Problem lässt sich mit einer Computersoftware sofort lösen.

Außerdem lässt sich dieses Problem etwas anders formulieren. Die letzte Zeile ist die Zielfunktion. Diese bleibt bestehen. Die anderen Nebenbedingungen kann man als Summe auffassen und erhält eine Gleichung der Form $\sum_i (\sum_j A(i, j) \cdot x(j)) \leq b(i)$. Wobei $A(i, j)$ eine Matrix ist, die als Einträge die Zutatenmengen der Kuchen beinhaltet. $x(j)$ ist ein Vektor, der aus den Zahlen x und y besteht und $b(i)$ ist ein Vektor mit den Einträgen des Vorrats.

5.2 Standortsuche bei der Feuerwehr

Das Standortproblem der Feuerwehr lässt sich auf ein Problem mit einer sehr ähnlichen Form zurückführen.

Zuerst gibt es mögliche Kandidaten für einen Standort und bestehende Ortsteile. Im Beispiel oben waren es Zutaten und Kuchenarten. Diese bilden eine Abhängigkeit, die in der Distanzmatrix D in Sekunden aufgetragen ist. Nun ist die Entscheidungsvariable x nicht mehr eindimensional sondern zweidimensional. Wird $x(i, j)=1$ gesetzt, bedeutet das, dass Ortsteil i von Kandidat j bedient wird. Der Vektor b wird zu Vektor t , der die Zeit (time) angibt, die höchstens für die Anfahrt benötigt werden darf. Da der Wert allerdings immer gleich ist, ist es möglich t hier als konstanten Wert zu betrachten. Um die Ortsteile zu charakterisieren, wird zusätzlich noch ein Risikowert $c(i)$ eingeführt, der je nach Ort einen anderen Wert angibt und aufsummiert 1 ergibt.

$$\text{Man erhält: } \sum_i (\sum_j c(i) \cdot D(i, j) \cdot x(i, j)) \leq t$$

$x(i, j)$ ist jetzt nicht mehr mindestens positiv wie im Beispiel, sondern darf nur noch die Werte 0 und 1 annehmen. Das heißt $x(i, j)=1$, wenn Ortsteil i von j bedient wird und $x(i, j)=0$, wenn Ortsteil i nicht von j bedient wird. Diese Eigenschaft von $x(i, j)$ heißt binär.

$$x(i, j) \in \{0, 1\} \quad \forall i, j$$

Jeder Ortsteil i soll außerdem von genau einer Feuerwache angefahren werden. Dazu muss $x(i,j)$ pro Ortsteil i genau für einem Kandidaten j den Eintrag $x(i,j)=1$ und sonst $x(i,j)=0$ aufweisen.

$$\sum_j x(i,j) = 1 \quad \forall i$$

Die Zielfunktion muss auch leicht abgeändert werden. Als sinnvolle Maßeinheit bietet sich die Durchschnittszeit an, die die Feuerwehr für jeden Ortsteil benötigt. Das heißt die Anfahrzeiten für jeden Ortsteil müssen aufsummiert werden und am Ende durch 18 (Anzahl der Ortsteile in Göttingen) geteilt werden. Diese Zeit soll minimiert werden.

$$\min \sum_i (\sum_j D(i,j) \cdot x(i,j)) : 18$$

Diese Durchschnittszeit ist die Maßeinheit, die es ermöglicht verschiedene Szenarien direkt zu vergleichen.

Dies genügt jedoch nicht, da die optimale Lösung jetzt wäre, jeden Kandidaten zu betreiben und somit überall in kürzester Zeit zu sein. Gesucht ist aber die minimale Menge an Standorten, die benötigt wird um die 1. und 2. Hilfsfrist einzuhalten. Man benötigt also eine weitere Variable, die angibt, welche Wachen betrieben werden dürfen. Wird $y(j)=1$ gesetzt, heißt das, dass Kandidat j betrieben wird und dass von diesem Kandidaten Ortsteile angefahren werden können. Also ist $y(j)$ wieder wie $x(i,j)$ binär. Das heißt $y(j)$ nimmt entweder den Wert 0 oder den Wert 1 an.

$$y(j) \in \{0, 1\} \quad \forall j$$

Wird $y(j)$ nun nach oben beschränkt, kann man die maximale Anzahl der Feuerwachen benennen (hier als Beispiel mit höchstens zwei zu betreibenden Feuerwachen).

$$\sum_j y(j) \leq 2$$

Nun fehlt noch die Kopplung von x und y , was bedeutet, dass jeder Ortsteil auch nur von einer Feuerwache angefahren werden kann, die auch betrieben wird. Ist die Summe aller $y(j)$ zum Beispiel mit 2 abgeschätzt, können in $x(i,j)$ nur noch genau zwei Spalten als Eintrag die 1 haben, alle anderen 0. Dass in einer Zeile allerdings mehr als eine 1 steht, ergibt keinen Sinn, da ein Ortsteil, wie oben gefordert, von genau einem Kandidaten bedient wird. Also folgt für die Koppelung von x und y :

$$y(j) \geq x(i,j) \quad \forall i, j$$

Insgesamt erhält man also folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} \min \sum_i (\sum_j D(i,j) \cdot x(i,j)) : 18 \\ \sum_i (\sum_j c(i) \cdot D(i,j) \cdot x(i,j)) \leq t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_j y(j) &\leq 2 \\ \sum_j x(i, j) &= 1 \quad \forall i \\ y(j) &\geq x(i, j) \quad \forall i, j \\ x(i, j) &\in \{0, 1\} \quad \forall i, j \\ y(j) &\in \{0, 1\} \quad \forall i, j \end{aligned}$$

Zusätzlich ist es möglich Werte von y festzulegen. Es ist also möglich von vornherein festzulegen welcher Kandidat auf jeden Fall oder auf keinen Fall betrieben werden soll. Zum Beispiel ist es für die 1. Hilfsfrist nötig festzulegen, dass die Wache in der Breslauer Straße weiterhin bestehen bleibt und in die Rechnung miteinbezogen wird. Dazu schreibt man als zusätzliche Nebenbedingung:

$$y(\text{BreslauerStrasse}) = 1$$

Das Problem löse ich mit der Software GLPK [4]. In GLPK übersetzt sieht das Modell wie folgt aus:

```

/* sets */
set ORT;
set WACHE;

/* parameters */
param DistTable {j in WACHE, i in ORT};
param Cost {i in ORT};

/* decision variables */
var x {i in ORT, j in WACHE} binary;   ### Ort i wird von Wache j bedient
var y {j in WACHE} binary;           ### Wache j wird gebaut

/* objective function */
minimize z: sum{i in ORT} (sum{j in WACHE} DistTable[j,i]*0.8*x[i,j])/18;   ###
Zielfunktion: Minimiere die durchschnittliche Anfahrtzeit

/* Constraints */
s.t. bauen: sum{j in WACHE} y[j] <=2;   ### Zwei Wachen können gebaut werden
s.t. echt{i in ORT}: sum{j in WACHE} x[i,j] = 1;   ### Jeder Ort wird von genau
einer Wache bedient
s.t. const{i in ORT, j in WACHE}: y[j]>=x[i,j];   ### Man kann nur von Wache be-
dient werden, die schon gebaut ist
s.t. warten: sum{i in ORT} (sum{j in WACHE} Cost[i]*0.8*DistTable[j,i]*x[i,j]) <=

```

```
420;   ### Jeder Ort soll nach 7 Minuten erreicht sein.
# s.t. breslau: y['KBr'] = 1;   ### Wache Breslauer Straße usw. existiert bereits
# s.t. ellie: y['KEllie'] = 0;
# s.t. esebeck: y['KEse'] = 0;
# s.t. geismar: y['KGeis'] = 0;
# s.t. grone: y['KGro'] = 0;
# s.t. grosse: y['KGrossE'] = 0;
# s.t. herb: y['KHerb'] = 0;
# s.t. hetj: y['KHetj'] = 0;
# s.t. holt: y['KHolt'] = 0;
# s.t. knut: y['KKnut'] = 0;
# s.t. niko: y['KNiko'] = 0;
# s.t. roringen: y['KRor'] = 0;
# s.t. stadt: y['KStadt'] = 0;
# s.t. weende: y['KWee'] = 0;
```

6 Vorgehensweise

Im Folgenden gilt es Koeffizienten für das in Kapitel fünf entwickelte Modell zu bestimmen.

Zur Erinnerung:

$$\begin{aligned} \min \sum_i (\sum_j D(i, j) \cdot x(i, j)) &: 18 \\ \sum_i (\sum_j c(i) \cdot D(i, j) \cdot x(i, j)) &\leq t \\ \sum_j y(j) &\leq 2 \\ \sum_j x(i, j) &= 1 \quad \forall i \\ y(j) &\geq x(i, j) \quad \forall i, j \\ x(i, j) &\text{ binary } \forall i, j \\ y(j) &\text{ binary } \forall j \end{aligned}$$

Unbestimmt sind bislang die Distanzmatrix D und der Risikowert c . Die Zeit t hängt von der konkreten Fragestellung ab.

6.1 Distanzmatrix

Um eine Distanzmatrix zu erstellen, benötigt man zunächst eine Menge von Ortsteilen und eine Menge von Kandidaten für die Feuerwehrlhäuser. Hier bietet es sich an, Göttingen in seine 18 Ortsteile zu zerlegen. Für die Kandidatenmenge der Feuerwehrlhäuser reicht diese Diskretisierung nicht aus, da ein optimaler Standort für ein oder mehrere Feuerwehrlhäuser gesucht wird. Theoretisch müsste also jeder Punkt auf der Karte der Stadt Göttingen als Kandidat herangezogen werden. Eine Feuerwache hat allerdings auch Ausmaße und exakt auf das optimale Gebiet wird man die Feuerwache in der Realität ohnehin nicht bauen können. Daher wird in dieser Bachelorarbeit mit einem Gitternetz von 250 Metern gearbeitet. Alle 250 Meter wird ein Punkt auf der Landkarte von Göttingen markiert. Dieser Punkt bezeichnet einen Kandidaten für ein Feuerwehrlhaus. Insgesamt erhält man 2374 Kandidaten. Nun hat man die Koordinaten der Kandidaten. Jetzt werden noch die Koordinaten der Stadtteile benötigt. Als einzige Quelle hierfür habe ich die Wikipedia gefunden. Die Distanzmatrix, also die Matrix bzw. Tabelle, die die Entfernung von jedem Kandidaten zu jedem Ortsteil angibt, lässt sich mit dem Kartenmaterial Google Maps und dem Dienst Google Distance Matrix bestimmen [1].

6.2 Risikowerte

Im Feuerwehrlbedarfsplan 2013 gibt es ein eigenes Kapitel über Risikofaktoren, in dem jedem Ortsteil ein bestimmter Risikofaktor zugeordnet wird. Diese Risikofaktoren ergeben sich aus Einwohnerzahlen, Anzahlen der Einsätze und individuellen Gefahrenquellen wie ansässiger Industrie oder Infrastruktur. Neben diesen Risikofaktoren hält der Feuerwehrlbedarfsplan 2013 die Einsatzzahlen der vergangenen Jahre und die Einwohnerzahlen der Ortsteile Göttingens bereit.

Nimmt man nun zusätzlich noch als Risikowert hinzu, dass jeder Ortsteil gleich stark gefährdet ist (nicht in der Tabelle aufgelistet), hat man vier verschiedene Risikowerte für jeden Ortsteil.

ORTSTEIL	EINSATZZAHLEN	EINWOHNER	RISIKOFAKTOR
Esebeck	1	616	3
Knutbühren	1	137	1
Hetjershausen	2	1121	3
Groß Ellershhausen	7	1409	7
Elliehausen	9	2848	8
Holtensen	6	1760	7
Grone	74	11627	23
Weststadt	105	12547	27
Weende	168	17846	28
Nordstadt	79	10417	25
Innenstadt	143	10075	28
Südstadt	80	17537	26
Oststadt	47	16232	16
Geismar	31	18144	19
Herberhausen	1	1690	6
Roringen	0	951	3
Nikolausberg	10	3641	9
Deppoldshausen	0	19	0
GESAMT	764	128617	239

6.3 Zeitanpassung

Bevor man nun die ersten Abfragen mit GLPK bearbeiten kann, muss noch bedacht werden, dass die Zeiten, die Google Maps bzw. Google Distance Matrix berechnet, nicht zwingend mit den Zeiten, die die Feuerwehr im Alarmfall benötigt, übereinstimmen müssen. Um die Zeiten der Distanzmatrix anzupassen, nimmt sich diese Arbeit eine Stichprobe von 99 Anfahrtszeiten aus den insgesamt 1484 gespeicherten Anfahrtszeiten aus den Jahren 2009 bis 2011. Es wird also ein Stichprobenumfang von ca. 6,7% der Anfahrtszeiten betrachtet. Diese Stichprobe ergibt, dass eine Minute Anfahrt bei Google ungefähr 0,8 Minuten für die Feuerwehr bedeutet und damit auch, dass eine Minute Anfahrtszeit für die Feuerwehr ungefähr 1,25 Minuten bei Google bedeutet.

7 Ergebnisse und Auswertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengestellt und graphisch ausgewertet.

In der Übersicht ist aufgelistet, welche Wachen betrieben werden sollten. Sie sind identifiziert durch eine fortlaufende Nummer und versehen mit einer genauen Koordinate und dem Ortsteil, in dem der Kandidat liegt, und welche Ortsteile sie in welcher Zeit (in Sekunden) bedienen können. Werte, die die Zeitvorgabe überschreiten sind in rot kenntlich gemacht. Zuletzt ist immer die durchschnittliche Anfahrtszeit angegeben, also der minimale Wert der Zielfunktion des Modells.

Anschließend ist das Ergebnis graphisch dargestellt und kurz kommentiert. Dabei sind die Ortsteile in vier Kategorien eingefärbt:

- rot: Hilfsfrist wird überschritten
- gelb: Anfahrtszeit liegt zwischen 75% und 100% der jeweiligen Hilfsfrist
- hellgrün: Anfahrtszeit liegt zwischen 50% und 75% der jeweiligen Hilfsfrist
- grün: Anfahrtszeit liegt unter 50% der jeweiligen Hilfsfrist

Zusätzlich sind die betrachteten Wachen mit schwarz und blau gekennzeichnet

- schwarz: Struktur besteht bereits, ggf. aber mit anderer Funktion
- blau: Struktur besteht noch nicht

Liegt ein Ergebnis für einen einzigen Ortsteil gering über der Hilfsfrist, wie zum Beispiel 270 Sekunden statt 240 Sekunden bei der 2. Hilfsfrist, so ist dieses Ergebnis zur Diskussion interessant und deshalb aufgenommen und durch ein zweites, besseres Ergebnis gesichert.

Interessanterweise liefern alle verschiedenen Risikowerte bei allen Abfragen das gleiche Ergebnis.

Zunächst wird die 1. Hilfsfrist betrachtet mit den Szenarien, dass zur Berufsfeuerwehrwache in der Breslauer Straße noch eine oder zwei zusätzliche Berufsfeuerwehrwachen entstehen sollen und die Analyse der Lösungsvorschläge der Feuerwehr mit Standorten der Berufsfeuerwehr in der Ortsfeuerwehr Weende, der Wache am Klinikum und einer neuen Wache im Bereich der Hermann-Kolbe-Straße.

Im Anschluss wird die 2. Hilfsfrist betrachtet. Hier wird zunächst nach vier Minuten und neun Minuten Anfahrtszeit unterschieden. Die Szenarien bei beiden Betrachtungsweisen sind gleich:

- Kein Standort der Freiwilligen Feuerwehr ist vorhanden
- Bestimmte Standorte sind vorhanden
- Es werden nur existierende Standorte der Freiwilligen Feuerwehr betrachtet

7.1 Erste Hilfsfrist

Zur Erinnerung: In der ersten Hilfsfrist sollen elf Funktionen der Berufsfeuerwehr innerhalb von 6,5 Minuten (390 Sekunden) Fahrtzeit am Einsatzort sein.

Szenario 1 Zunächst wird zusätzlich zur Berufsfeuerwehrwache in der Breslauer Straße eine weitere Wache gebaut:

- Wache K1692 (Weststadt; 51.553448, 9.8883370)
 - Esebeck (306)
 - Knutbühren (420)
 - Hetjershausen (249)
 - Groß Ellershausen (363)
 - Elliehausen (119)
 - Holtensen (178)
 - Grone (226)
 - Weststadt (177)
 - Weende (242)
 - Herberhausen (418)
 - Roringen (530)
 - Nikolausberg (548)
 - Deppoldshausen (618)
- Berufsfeuerwehr Breslauer Straße
 - Nordstadt (310)
 - Innenstadt (259)
 - Südstadt (333)
 - Oststadt (190)
 - Geismar (119)

Durchschnittszeit: ca. 311 Sekunden

Diese zusätzliche Wache lässt sich im nördlichen Bereich der Otto-Brenner-Straße verorten. Im Schnitt werden alle Ortsteile innerhalb von etwas mehr als fünf Minuten erreicht, trotzdem wird für die nord-östlichen Ortsteile und Knutbühren die Zeitgrenze von 6,5 Minuten überschritten.

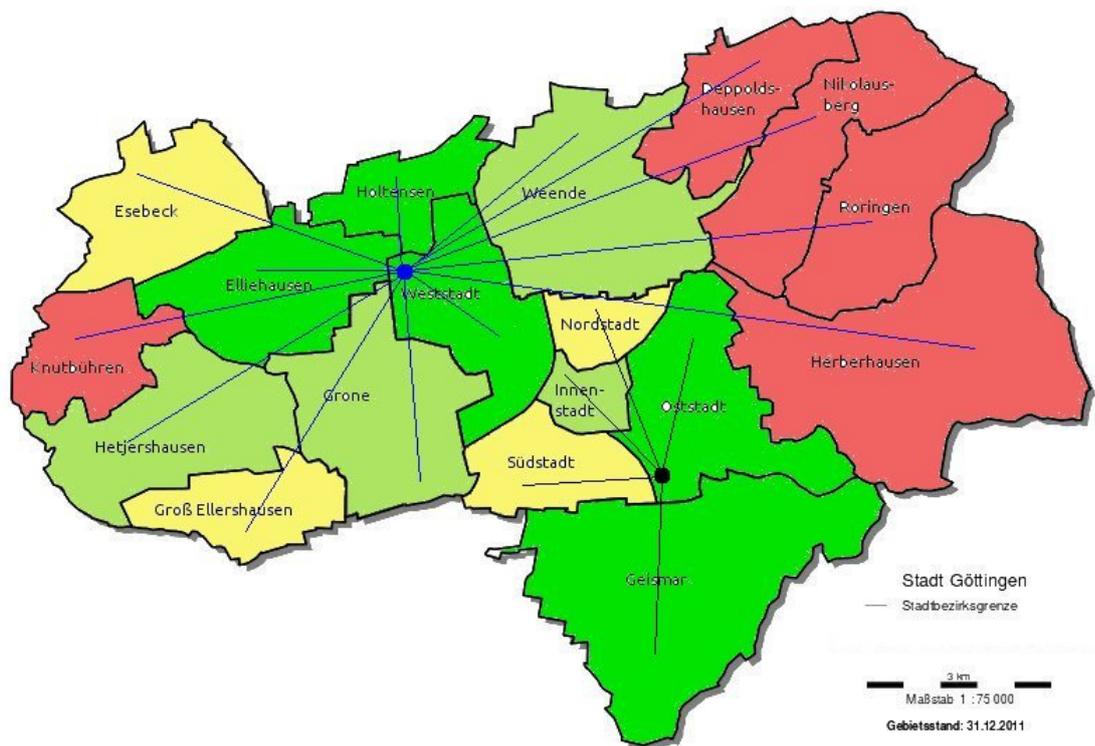


Abbildung 14: Graphische Auswertung von Szenario 1

Szenario 2 Mit insgesamt drei Berufsfeuerwehrwachen würden sich auch die genannten Ortsteile abdecken lassen:

- Wache K1312 (Grone; 51.537348, 9.8809370)
 - Esebeck (372)
 - Knutbühren (295)
 - Hetjershausen (124)
 - Groß Ellershausen (239)
 - Elliehausen (170)
 - Holtensen (294)
 - Grone (203)
 - Weststadt (256)

- Wache K1713 (B27/Faßberg; 51.553448, 9.9660370)
 - Weende (207)
 - Nordstadt (249)
 - Herberhausen (105)

- Roringen (216)
- Nikolausberg (252)
- Deppoldshausen (241)
- Berufsfeuerwehr Breslauer Straße
 - Innenstadt (259)
 - Südstadt (333)
 - Oststadt (190)
 - Geismar (119)

Durchschnittszeit: ca. 235 Sekunden

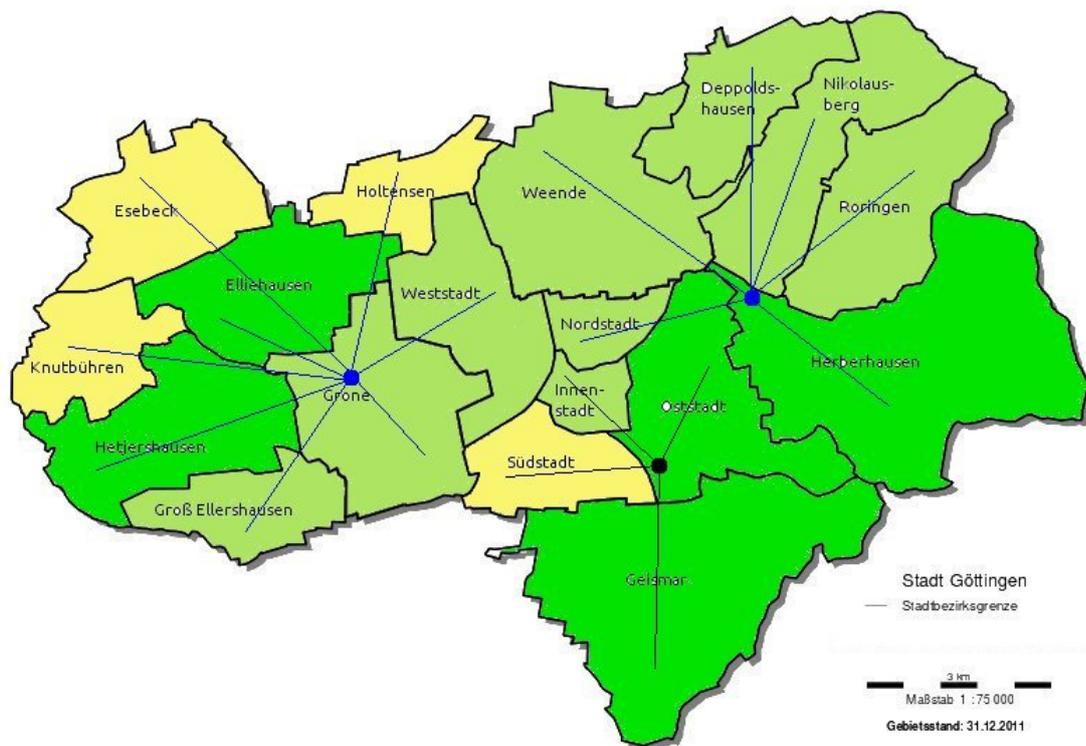


Abbildung 15: Graphische Auswertung von Szenario 2

Mit einer zusätzlichen Wache im Nord-Osten Göttingens im Bereich der B27 kann der Nord-Osten Göttingens innerhalb der 6,5 Minuten von einem Löschzug erreicht werden. Dadurch ist die potentielle Wache im Westen Göttingens auch nur noch für den West-Bereich zuständig und kann etwas weiter Richtung Süden im südlichen Bereich der Otto-Brenner-Straße verortet werden und somit auch Knutbühren innerhalb von 6,5 Minuten erreichen.

Die Feuerwehr Göttingen gab als Lösungsvorschläge (siehe Kapitel 2) an, dass der Nord-Osten

Göttingens durch eine Erweiterung der Wache am Klinikum oder der Ortsfeuerwehr Weende in der 1. Hilfsfrist abgedeckt werden könnte. Der Westen Göttingens könnte durch einen Neubau einer Feuerwache im Bereich der Hermann-Kolbe-Straße abgedeckt werden.

Szenario 3 Zusätzlich zur Wache der Berufsfeuerwehr in der Breslauer Straße wird die Ortsfeuerwehr Weende mit hauptamtlichen Kräften besetzt und somit ein weiterer Standort der Berufsfeuerwehr:

- Freiwillige Feuerwehr Weende
 - Esebeck (614)
 - Knutbühren (759)
 - Hetjershausen (594)
 - Groß Ellershausen (547)
 - Elliehausen (419)
 - Holtensen (369)
 - Weststadt (359)
 - Weende (151)
 - Roringen (536)
 - Nikolausberg (536)
 - Deppoldshausen (503)

- Berufsfeuerwehr Breslauer Straße
 - Grone (414)
 - Nordstadt (310)
 - Innenstadt (259)
 - Südstadt (333)
 - Oststadt (190)
 - Geismar (119)
 - Herberhausen (428)

Durchschnittszeit: ca. 413 Sekunden

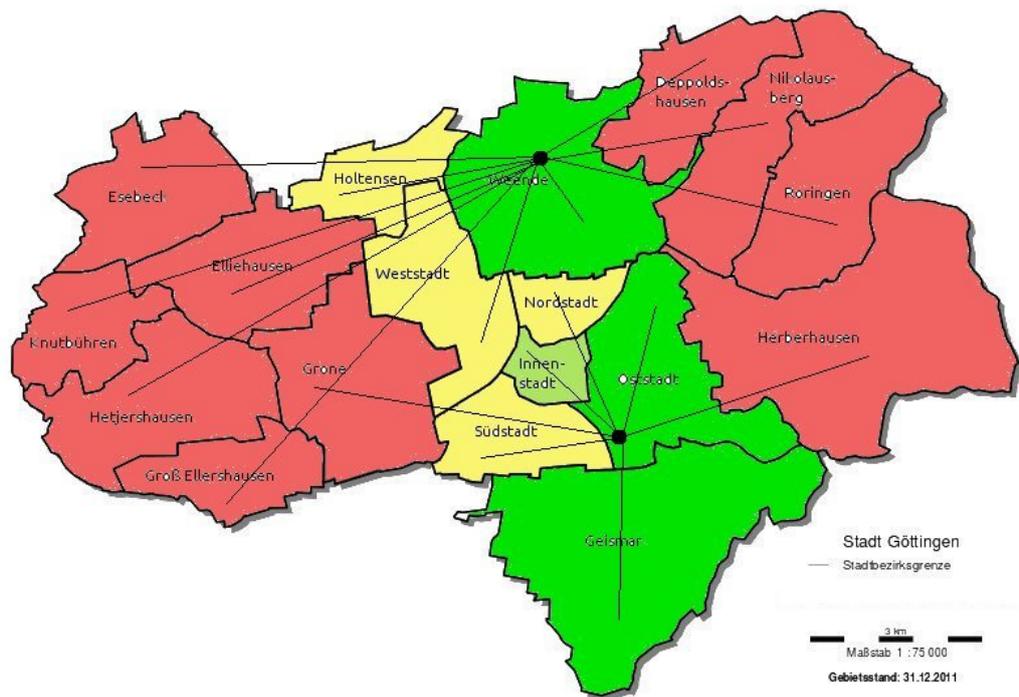


Abbildung 16: Graphische Auswertung von Szenario 3

Szenario 4 Zusätzlich zur Wache der Berufsfeuerwehr in der Breslauer Straße wird die Wache am Klinikum mit mehr hauptamtlichen Kräften besetzt und somit ein weiterer vollwertiger Standort der Berufsfeuerwehr:

- Wache Klinikum
 - Eisebeck (667)
 - Hetjershausen (634)
 - Elliehausen (472)
 - Holtensen (414)
 - Weststadt (393)
 - Weende (240)
 - Nordstadt (220)
 - Herberhausen (293)
 - Roringen (391)
 - Nikolausberg (419)
 - Deppoldshausen (424)
- Berufsfeuerwehr Breslauer Straße
 - Knutbühren (806)

- Groß Ellershausen (615)
- Grone (414)
- Innenstadt (259)
- Südstadt (333)
- Oststadt (190)
- Geismar (119)

Durchschnittszeit: ca. 406 Sekunden

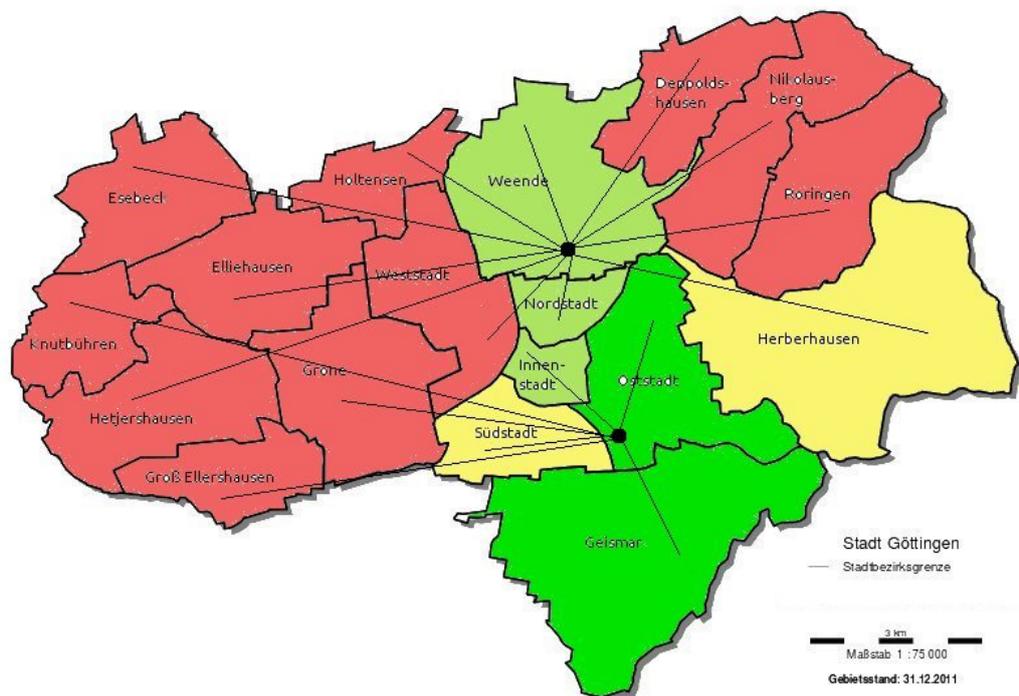


Abbildung 17: Graphische Auswertung von Szenario 4

Szenario 5 Zusätzlich zur Wache der Berufsfeuerwehr in der Breslauer Straße wird im Bereich der Hermann-Kolbe-Straße ein neuer Standort der Berufsfeuerwehr gebaut:

- Wache Hermann-Kolbe-Straße
 - Esebeck (309)
 - Knutbühren (454)
 - Hetjershausen (321)
 - Groß Ellershausen (422)
 - Elliehausen (114)
 - Holtensen (157)

- Grone (281)
 - Weststadt (293)
 - Weende (326)
 - Nikolausberg (651)
 - Deppoldshausen (710)
- Berufsfeuerwehr Breslauer Straße
 - Nordstadt (310)
 - Innenstadt (259)
 - Südstadt (333)
 - Oststadt (190)
 - Geismar (119)
 - Herberhausen (428)
 - Roringen (582)

Durchschnittszeit: ca. 348 Sekunden

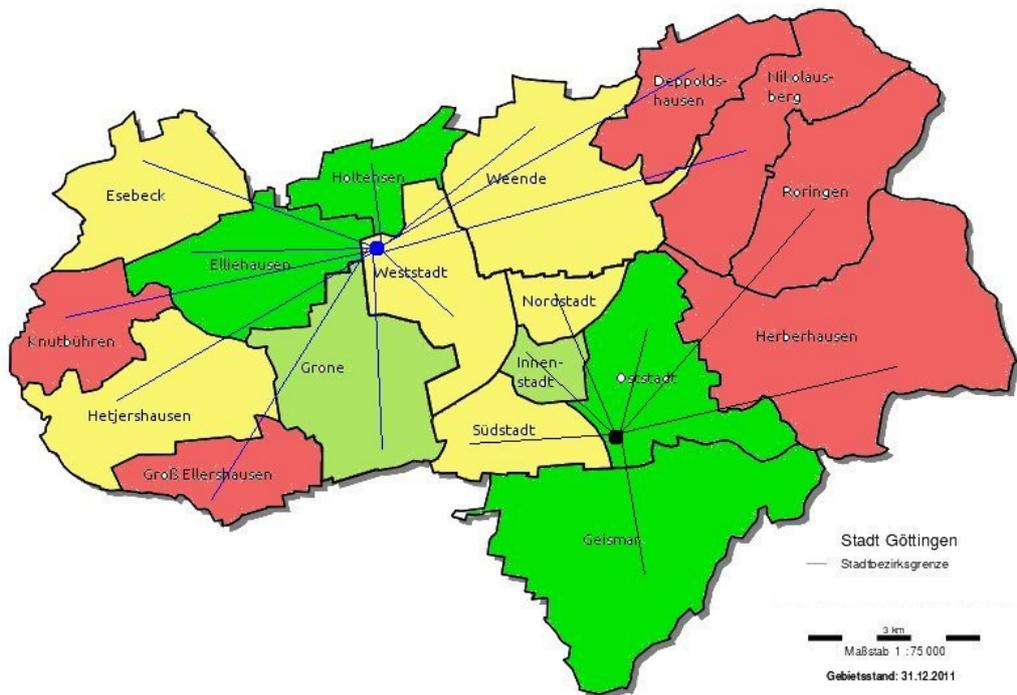


Abbildung 18: Graphische Auswertung von Szenario 5

Durch eine Zwei-Standorte-Lösung kann die 1. Hilfsfrist also nicht für das Stadtgebiet Göttingen gesichert werden. Im Durchschnitt bleibt nur die Zwei-Standorte-Lösung mit der Hermann-Kolbe-Straße unter 6,5 Minuten Anfahrtszeit. Der Osten und Teile des Westens Göttingens können dabei jedoch nicht innerhalb von 6,5 Minuten erreicht werden.

Szenario 6 Zusätzlich zur Wache der Berufsfeuerwehr in der Breslauer Straße und dem potentiellen neuen Standort in der Hermann-Kolbe Straße wird die Wache am Klinikum durch mehr hauptamtliches Personal zu einer vollwertigen Wache der Berufsfeuerwehr. Insgesamt stehen in Göttingen damit drei Feuerwachen der Berufsfeuerwehr zum Erreichen der 1. Hilfsfrist zur Verfügung:

- Wache Klinikum
 - Weende (240)
 - Nordstadt (220)
 - Herberhausen (293)
 - Roringen (391)
 - Nikolausberg (419)
 - Deppoldshausen (424)

- Wache Hermann-Kolbe-Straße
 - Esebeck (309)
 - Knutbühren (454)
 - Hetjershausen (321)
 - Groß Ellershausen (422)
 - Elliehausen (114)
 - Holtensen (157)
 - Grone (281)
 - Weststadt (293)

- Berufsfeuerwehr Breslauer Straße
 - Innenstadt (259)
 - Südstadt (333)
 - Oststadt (190)
 - Geismar (119)

Durchschnittszeit: ca. 291 Sekunden

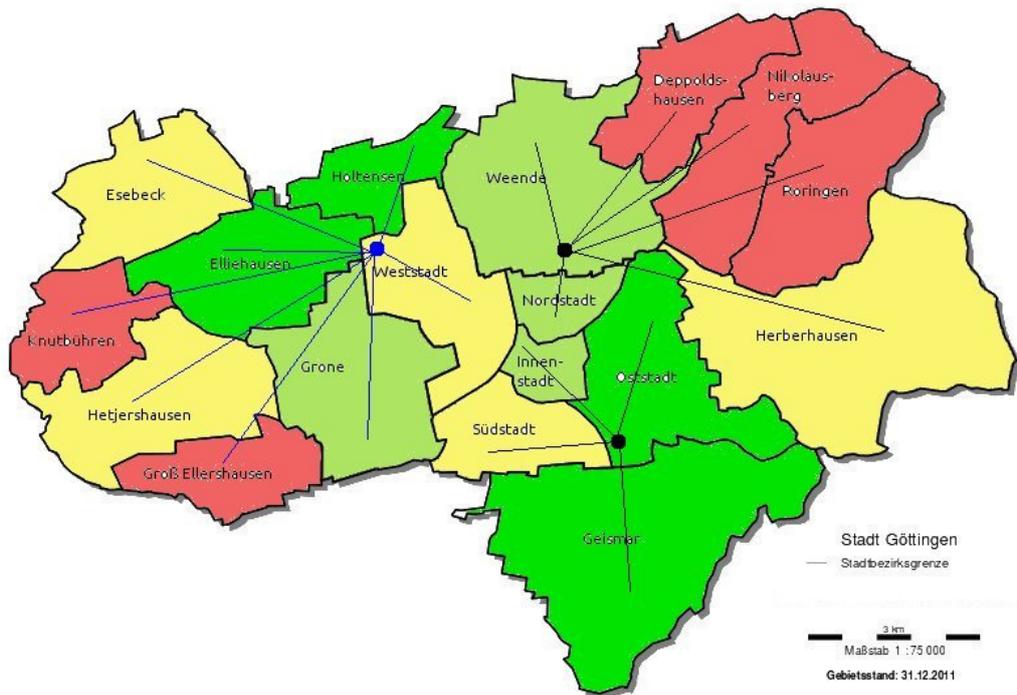


Abbildung 19: Graphische Auswertung von Szenario 6

Szenario 7 Zusätzlich zur Wache der Berufsfeuerwehr in der Breslauer Straße und dem potentiellen neuen Standort in der Hermann-Kolbe Straße wird die Ortsfeuerwehr Weende mit hauptamtlichen Kräften besetzt und somit ein weiterer, dritter Standort der Berufsfeuerwehr:

- Freiwillige Feuerwehr Weende
 - Weende (151)
 - Roringen (536)
 - Nikolausberg (536)
 - Deppoldshausen (503)
- Wache Hermann-Kolbe-Straße
 - Eisebeck (309)
 - Knutbühren (454)
 - Hetjershausen (321)
 - Groß Ellershausen (422)
 - Elliehausen (114)
 - Holtensen (157)
 - Grone (281)

- Weststadt (293)
- Berufsfeuerwehr Breslauer Straße
 - Nordstadt (310)
 - Innenstadt (259)
 - Südstadt (333)
 - Oststadt (190)
 - Geismar (119)
 - Herberhausen (428)

Durchschnittszeit: ca. 317 Sekunden

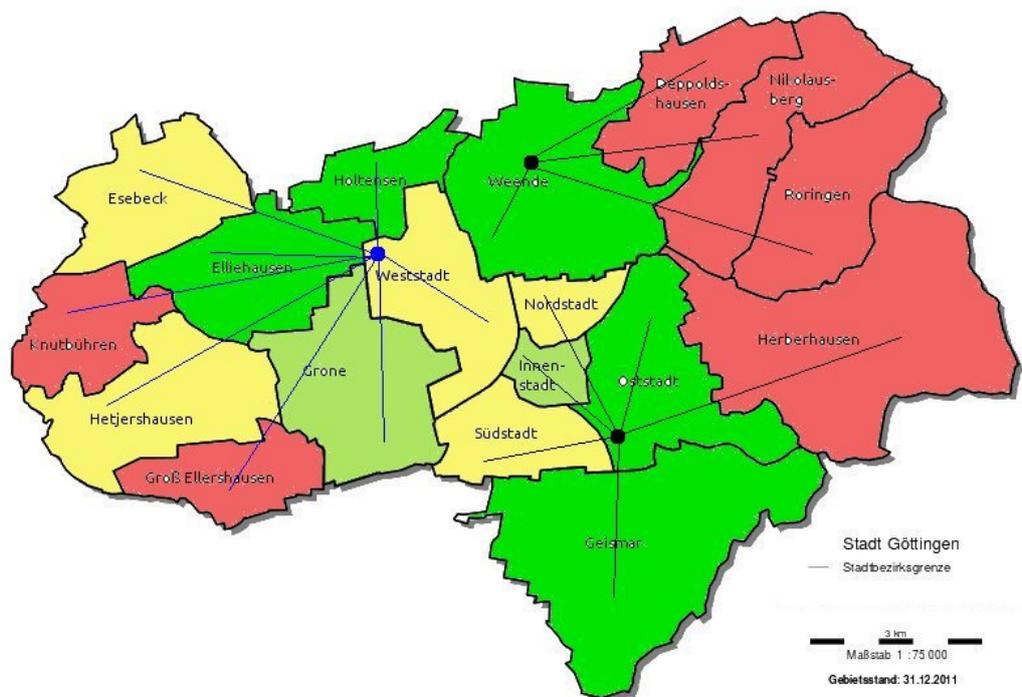


Abbildung 20: Graphische Auswertung von Szenario 7

Ergebnis Mit insgesamt zwei Standorten der Berufsfeuerwehr lässt sich Göttingen in der 1. Hilfsfrist nicht ausreichend abdecken. Mit insgesamt drei Standorten dagegen lässt sich Göttingen in der 1. Hilfsfrist abdecken (Szenario 2). Die Feuerwehrstandorte am Klinikum und in Weende sind dabei nicht weit genug im Westen, um die Dörfer im westlichen Stadtgebiet Göttingens abzudecken. Hier ist eine Feuerwache im Bereich der B27 in der Nähe des Nordbereiches der Georg-August-Universität nötig.

Im Westbereich ist eine Wache im nördlichen Teil der Otto-Brenner-Straße oder der Hermann-Kolbe-Straße nicht ausreichend. Im südlichen Bereich der Otto-Brenner-Straße wäre ein weiterer

Standort der Berufsfeuerwehr durchaus denkbar. Hier wäre es auch möglich den Westbereich Göttingens in der 1. Hilfsfrist abzudecken. Genug freie Fläche zum Bau eines Standortes an der B27 und auch im Bereich der südlichen Otto-Brenner-Straße in der Nähe der Autobahn wäre durchaus vorhanden. Somit sind diese Ergebnisse ohne Probleme in der Realität umsetzbar.

7.2 Zweite Hilfsfrist

Zur Erinnerung: In der zweiten Hilfsfrist sollen innerhalb von 13 Minuten nach Alarmierung weitere sechs Funktionen der Freiwilligen Feuerwehr am Einsatzort sein. Dabei wird der Freiwilligen Feuerwehr einmal vier Minuten (240 Sekunden) für die Anfahrt zum Einsatzort gegeben und einmal neun Minuten (540 Sekunden).

7.2.1 Vier Minuten Anfahrtszeit

Szenario 8 Es ist keine Ortsfeuerwehr vorhanden. Alle Feuerwehrrhäuser können frei über Göttingen verteilt werden:

- Wache K899 (Geismar; 51.518948, 9.9512370)
 - Oststadt (214)
 - Geismar (18)
- Wache K1163 (Innenstadt; 51.530448, 9.9290370)
 - Grone (194)
 - Nordstadt (176)
 - Innenstadt (86)
 - Südstadt (158)
- Wache K1198 (Hetjershausen; 51.532748, 9.8587370)
 - Knutbühren (213)
 - Hetjershausen (2)
 - Groß Ellershausen (165)
- Wache K1632 (Elliehausen; 51.551148, 9.8661370)
 - Esebeck (135)
 - Elliehausen (38)
- Wache K1607 (B27 nahe Tonollo; 51.548848, 9.9734370)
 - Weende (234)

- Herberhausen (78)
- Roringen (188)
- Nikolausberg (280)
- Wache K1696 (Weststadt; 51.553448, 9.9031370)
 - Holtensen (104)
 - Weststadt (56)
- Wache K2360 (Deppoldshausen; 51.581048, 9.9623370)
 - Deppoldshausen (23)

Durchschnittszeit: ca. 131 Sekunden

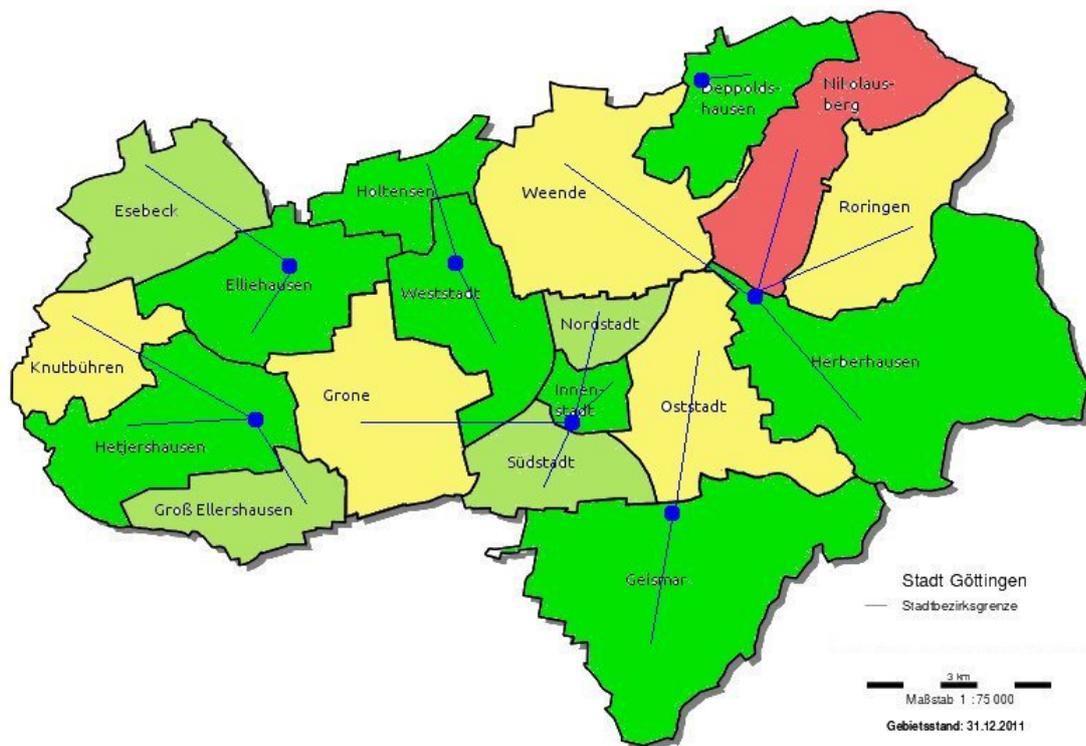


Abbildung 21: Graphische Auswertung von Szenario 8

Offensichtlich reichen sieben Wachen der Freiwilligen Feuerwehr nicht aus, um die zweite Hilfsfrist zu erreichen, obwohl Göttingen bis auf Nikolausberg komplett abgedeckt ist.

Szenario 9 Mit acht Wachen der Freiwilligen Feuerwehr lässt sich in diesem Szenario die zweite Hilfsfrist sichern:

- Wache K899 (Geismar; 51.518948, 9.9512370)

- Oststadt (214)
- Geismar (18)
- Wache K1163 (Innenstadt; 51.530448, 9.9290370)
 - Grone (194)
 - Nordstadt (176)
 - Innenstadt (86)
 - Südstadt (158)
- Wache K1198 (Hetjershausen; 51.532748, 9.8587370)
 - Knutbühren (213)
 - Hetjershausen (2)
 - Groß Ellershausen (165)
- Wache K1607 (B27 nahe Tonollo; 51.548848, 9.9734370)
 - Weende (234)
 - Herberhausen (78)
 - Roringen (188)
- Wache K1632 (Elliehausen; 51.551148, 9.8661370)
 - Esebeck (135)
 - Elliehausen (38)
- Wache K1696 (Weststadt; 51.553448, 9.9031370)
 - Holtensen (104)
 - Weststadt (56)
- Wache K1987 (Nikolausberg; 51.564948, 9.9808370)
 - Nikolausberg (25)
- Wache K2360 (Deppoldshausen; 51.581048, 9.9623370)
 - Deppoldshausen (23)

Durchschnittszeit: ca. 117 Sekunden

Mit acht Ortsfeuerwehren wäre für Göttingen das 2. Schutzziel erreicht. Die Standorte Elliehausen, Hetjershausen, Geismar, Nikolausberg und Deppoldshausen sind dabei nicht weit von real existierenden Standorten der Freiwilligen Feuerwehr entfernt.

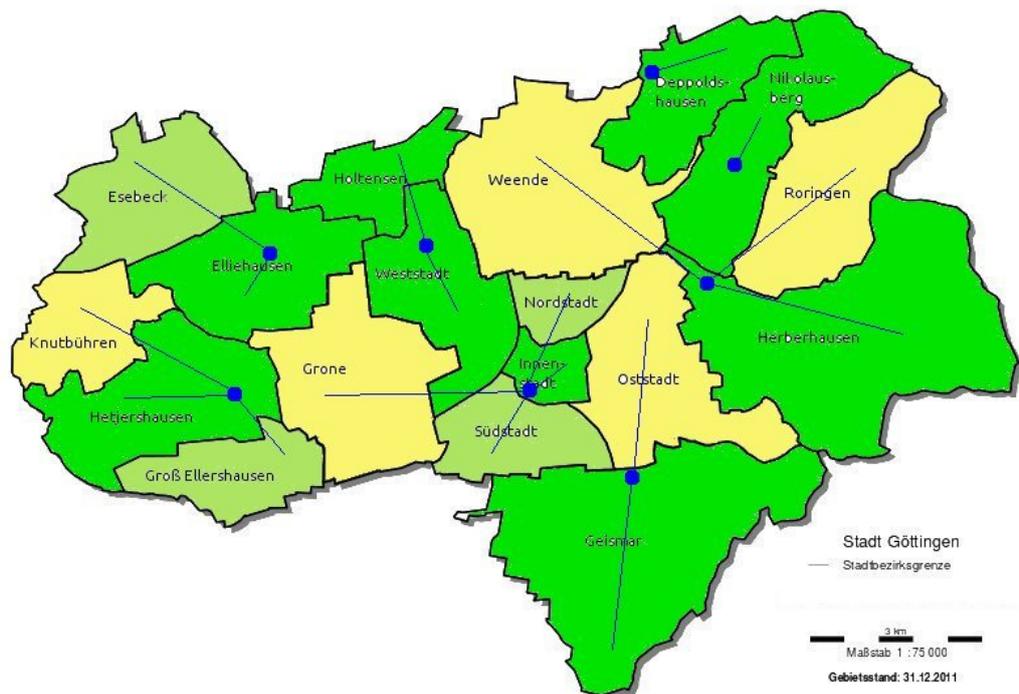


Abbildung 22: Graphische Auswertung von Szenario 9

Szenario 10 Die Feuerwehrlhäuser in Elliehausen, Grone und Geismar sind fest:

- Wache K1001 (Südstadt; 51.523548, 9.9290370)
 - Südstadt (2)
- Wache K1198 (Hetjershausen; 51.532748, 9.8587370)
 - Knutbühren (213)
 - Hetjershausen (2)
 - Groß Ellershausen (165)
- Wache K1382 (Nordstadt; 51.539648 9.9401370)
 - Nordstadt (25)
 - Innenstadt (214)
 - Oststadt (190)
- Wache K1607 (B27 nahe Tonollo; 51.548848, 9.9734370)
 - Weende (234)
 - Herberhausen (78)
 - Roringen (188)

- Nikolausberg (280)
- Wache K1696 (Weststadt; 51.553448, 9.9031370)
 - Holtensen (104)
 - Weststadt (56)
- Wache K2360 (Deppoldshausen; 51.581048, 9.9623370)
 - Deppoldshausen (23)
- Freiwillige Feuerwehr Elliehausen
 - Elliehausen (75)
- Freiwillige Feuerwehr Esebeck
 - Esebeck (6)
- Freiwillige Feuerwehr Geismar
 - Geismar (114)
- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Grone (25)

Durchschnittszeit: ca. 111 Sekunden

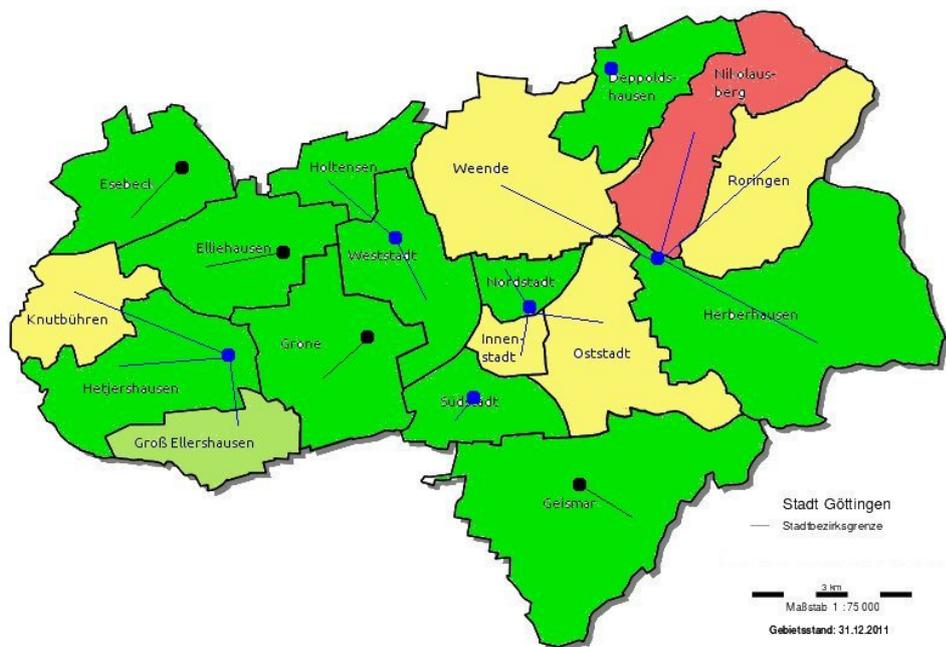


Abbildung 23: Graphische Auswertung von Szenario 10

Hier begegnen wir dem gleichen Problem wie beim vorherigen Szenario. Nikolausberg wird nicht in der zweiten Hilfsfrist abgedeckt. Interessanterweise ist die Ortsfeuerwehr Esebeck ein optimaler Standort in diesem Szenario, obwohl dieser Standort nicht als fest gegeben ist.

Szenario 11 Eine weitere Wache der Freiwilligen Feuerwehr sichert auch hier wieder das gesamte Stadtgebiet:

- Wache K1001 (Südstadt; 51.523548, 9.9290370)
 - Südstadt (2)
- Wache K1198 (Hetjershausen; 51.532748, 9.8587370)
 - Knutbühren (213)
 - Hetjershausen (2)
 - Groß Ellershausen (165)
- Wache K1382 (Nordstadt; 51.539648, 9.9401370)
 - Nordstadt (25)
 - Innenstadt (214)
 - Oststadt (190)
- Wache K1607 (B27 nahe Tonollo; 51.548848, 9.9734370)
 - Weende (234)
 - Herberhausen (78)
 - Roringen (188)
- Wache K1643 (Weststadt; 51.551148, 9.9068370)
 - Holtensen (127)
 - Weststadt (33)
- Wache K1987 (Nikolausberg; 51.564948, 9.9808370)
 - Nikolausberg (25)
- Wache K2360 (Deppoldshausen; 51.581048, 9.9623370)
 - Deppoldshausen (23)
- Freiwillige Feuerwehr Elliehausen
 - Elliehausen (75)

- Freiwillige Feuerwehr Esebeck
 - Esebeck (6)
- Freiwillige Feuerwehr Geismar
 - Geismar (114)
- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Grone (25)

Durchschnittszeit: ca. 97 Sekunden

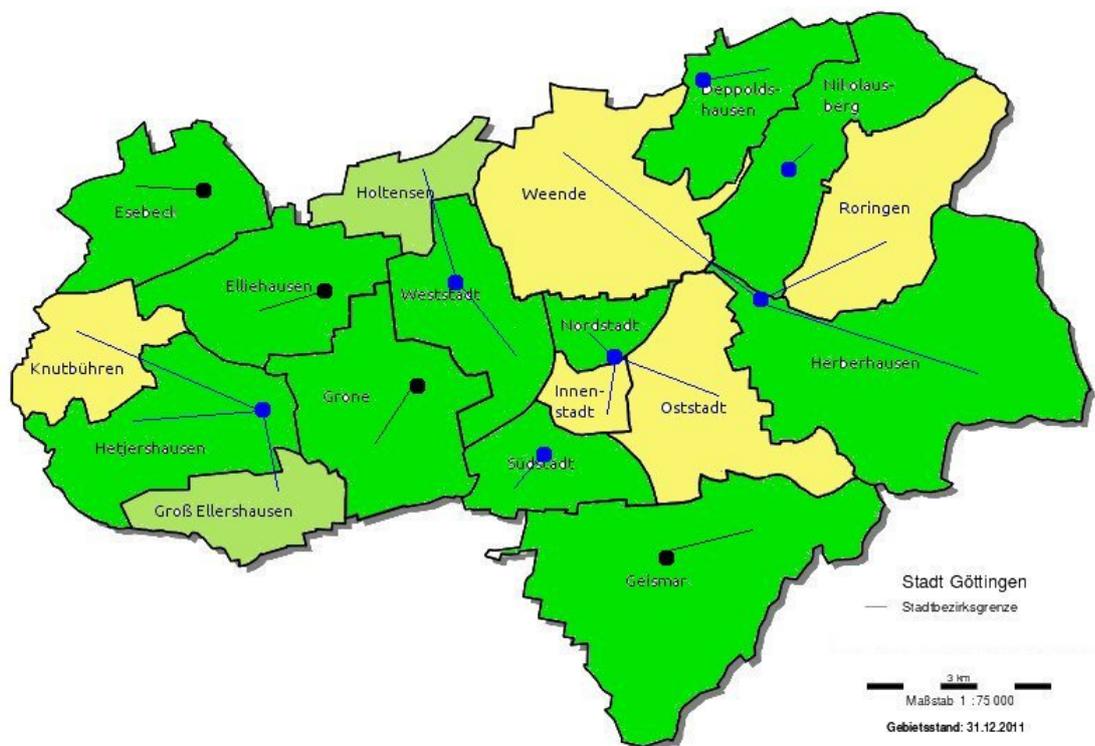


Abbildung 24: Graphische Auswertung von Szenario 11

Mit elf Ortsfeuerwehren wäre für Göttingen das 2. Schutzziel erreicht, wenn die Standorte in Elliehausen, Grone und Geismar als fest angesehen werden. Die Standorte in Deppoldshausen, Nikolausberg und Hetjershausen sind dabei nicht weit von real existierenden Ortsfeuerwehren entfernt. Der optimale Standort in Esebeck ist sogar das dortige Feuerwehrhaus.

Szenario 12 Die Stadteile Elliehausen, Grone, Geismar, Herberhausen, Weende sind fest (mindestens 35 aktive Mitglieder):

- Wache K1163 (Innenstadt; 51.530448, 9.9290370)

- Nordstadt (176)
- Innenstadt (86)
- Südstadt (158)
- **Oststadt (274)**
- Wache K1198 (Hetjershausen; 51.532748, 9.8587370)
 - Knutbühren (213)
 - Hetjershausen (2)
 - Groß Ellershausen (165)
- Wache K1696 (Weststadt; 51.553448, 9.9031370)
 - Holtensen (104)
 - Weststadt (56)
- Wache K1832 (Roringen; 51.558048, 10.006737)
 - Roringen (17)
- Wache K1987 (Nikolausberg; 51.564948, 9.9808370)
 - Nikolausberg (25)
- Wache K2360 (Deppoldshausen; 51.581048, 9.9623370)
 - Deppoldshausen (23)
- Freiwillige Feuerwehr Elliehausen
 - Elliehausen (75)
- Freiwillige Feuerwehr Esebeck
 - Esebeck (6)
- Freiwillige Feuerwehr Geismar
 - Geismar (114)
- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Grone (25)
- Freiwillige Feuerwehr Herberhausen
 - Herberhausen (9)

- Freiwillige Feuerwehr Weende
 - Weende (151)

Durchschnittszeit: ca. 93 Sekunden

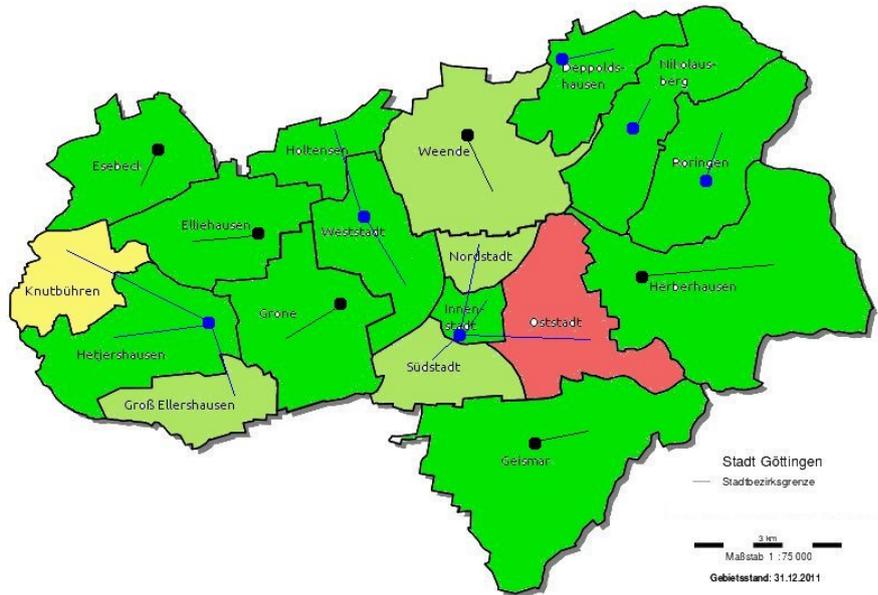


Abbildung 25: Graphische Auswertung von Szenario 12

Hier ist die Oststadt als einziger Ortsteil nicht ausreichend abgedeckt.

Szenario 13 Eine Wache mehr schafft Abhilfe:

- Wache K1001 (Südstadt; 51.523548, 9.9290370)
 - Südstadt (2)
- Wache K1198 (Hetjershausen; 51.532748, 9.8587370)
 - Knutbühren (213)
 - Hetjershausen (2)
 - Groß Ellershausen (165)
- Wache K1382 (Nordstadt; 51.539648, 9.9401370)
 - Nordstadt (25)
 - Innenstadt (214)
 - Oststadt (190)
- Wache K1643 (Weststadt; 51.551148, 9.9068370)

- Holtensen (127)
- Weststadt (33)
- Wache K1832 (Roringen; 51.558048, 10.006737)
 - Roringen (17)
- Wache K1987 (Nikolausberg; 51.564948, 9.9808370)
 - Nikolausberg (25)
- Wache K2360 (Deppoldshausen; 51.581048, 9.9623370)
 - Deppoldshausen (23)
- Freiwillige Feuerwehr Elliehausen
 - Elliehausen (75)
- Freiwillige Feuerwehr Esebeck
 - Esebeck (6)
- Freiwillige Feuerwehr Geismar
 - Geismar (114)
- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Grone (25)
- Freiwillige Feuerwehr Herberhausen
 - Herberhausen (9)
- Freiwillige Feuerwehr Weende
 - Weende (151)

Durchschnittszeit: ca. 79 Sekunden

Mit dreizehn Ortsfeuerwehren wäre für Göttingen das 2. Schutzziel erreicht, wenn die Standorte in Elliehausen, Grone, Geismar, Weende und Herberhausen als fest angesehen werden. Die Standorte in Deppoldshausen, Nikolausberg, Roringen und Hetjershausen sind dabei nicht weit von real existierenden Ortsfeuerwehren entfernt. Der optimale Standort in Esebeck ist sogar das dortige Feuerwehrhaus.

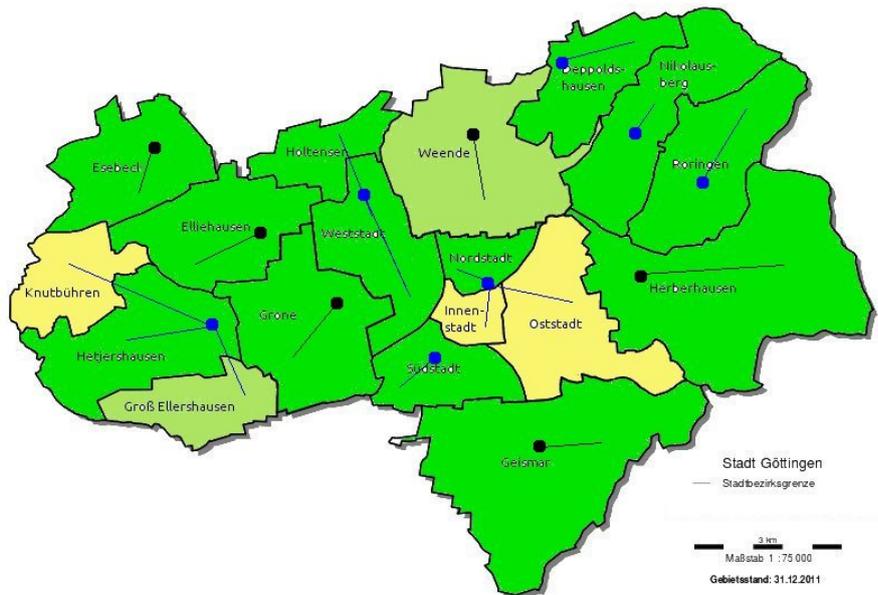


Abbildung 26: Graphische Auswertung von Szenario 13

Szenario 14 Die Stützpunktfeuerwehren Geismar, Grone, Weende, Nikolausberg, Holtensen und Herberhausen sind fest:

- Wache K1163 (Innenstadt; 51.530448, 9.9290370)
 - Nordstadt (176)
 - Innenstadt (86)
 - Südstadt (158)
 - **Oststadt (274)**
- Wache K1198 (Hetjershausen; 51.532748, 9.8587370)
 - Knutbühren (213)
 - Hetjershausen (2)
 - Groß Ellershausen (165)
- Wache K1632 (Elliehausen; 51.551148, 9.8661370)
 - Esebeck (135)
 - Elliehausen (38)
- Wache K1832 (Roringen; 51.558048, 10.006737)
 - Roringen (17)
- Wache K2360 (Deppoldshausen; 51.581048, 9.9623370)

- Deppoldshausen (23)
- Freiwillige Feuerwehr Geismar
 - Geismar (114)
- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Grone (25)
 - Weststadt (227)
- Freiwillige Feuerwehr Herberhausen
 - Herberhausen (9)
- Freiwillige Feuerwehr Holtensen
 - Holtensen (123)
- Freiwillige Feuerwehr Nikolausberg
 - Nikolausberg (107)
- Freiwillige Feuerwehr Weende
 - Weende (151)

Durchschnittszeit: ca. 136 Sekunden

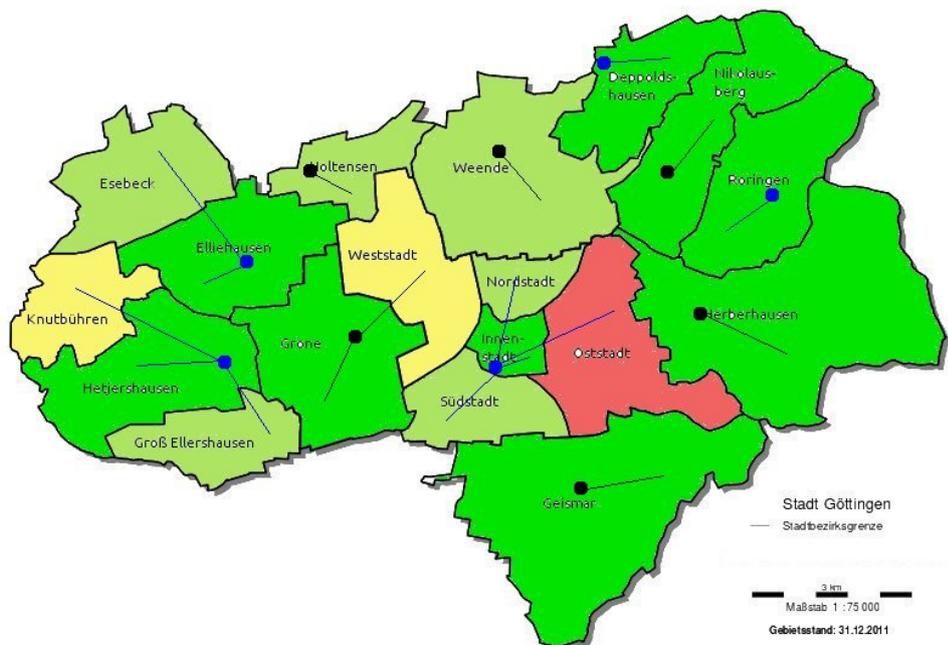


Abbildung 27: Graphische Auswertung von Szenario 14

Auch hier ist die Oststadt wieder nicht ausreichend abgedeckt.

Szenario 15 Auch dieses Szenario muss um eine Wache der Freiwilligen Feuerwehr erweitert werden:

- Wache K1001 (Südstadt; 51.523548, 9.9290370)
 - Südstadt (2)
- Wache K1198 (Hetjershausen; 51.532748, 9.8587370)
 - Knutbühren (213)
 - Hetjershausen (2)
 - Groß Ellershausen (165)
- Wache K1382 (Nordstadt; 51.539648 9.9401370)
 - Nordstadt (25)
 - Innenstadt (124)
 - Oststadt (190)
- Wache K1632 (Elliehausen; 51.551148, 9.8661370)
 - Esebeck (135)
 - Elliehausen (38)
- Wache K1832 (Roringen; 51.558048, 10.006737)
 - Roringen (17)
- Wache K2360 (Deppoldshausen; 51.581048, 9.9623370)
 - Deppoldshausen (23)
- Freiwillige Feuerwehr Geismar
 - Geismar (114)
- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Grone (25)
 - Weststadt (227)
- Freiwillige Feuerwehr Herberhausen
 - Herberhausen (9)
- Freiwillige Feuerwehr Holtensen

- Holtensen (123)
- Freiwillige Feuerwehr Nikolausberg
 - Nikolausberg (107)
- Freiwillige Feuerwehr Weende
 - Weende (151)

Durchschnittszeit: ca. 99 Sekunden

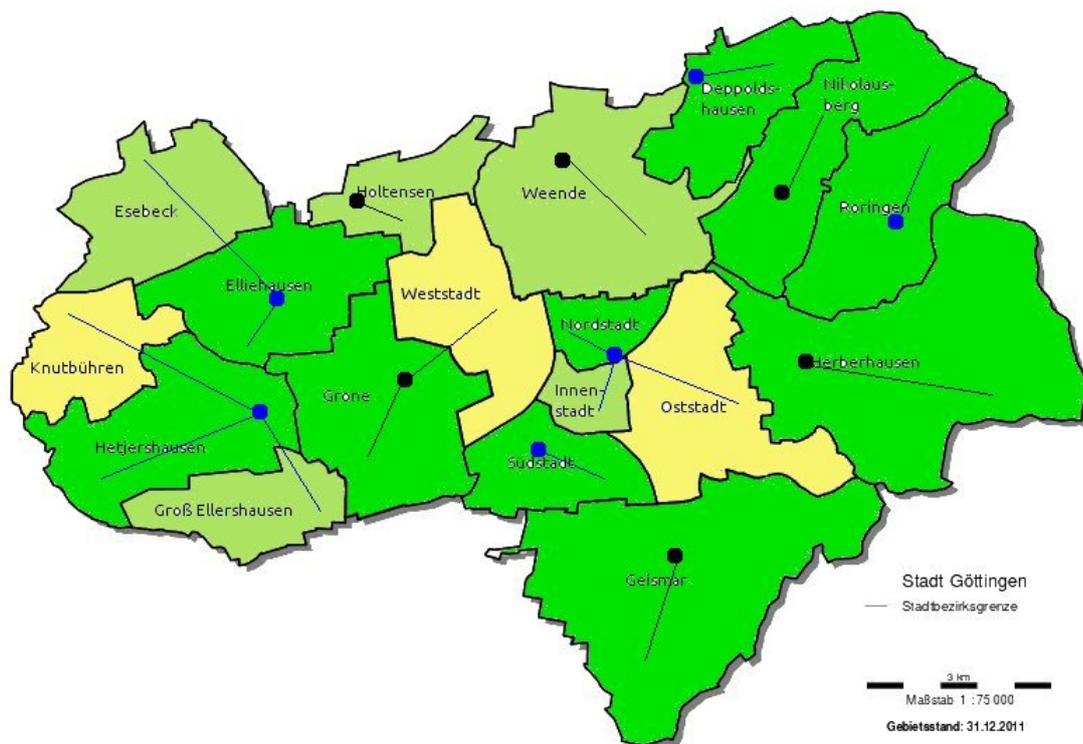


Abbildung 28: Graphische Auswertung von Szenario 15

Mit zwölf Ortsfeuerwehren wäre für Göttingen das 2. Schutzziel erreicht, wenn die Stützpunktfeuerwehren in Gröne, Geismar, Holtensen, Herberhausen, Weende und Nikolausberg als fest angesehen werden. Die Standorte in Deppoldshausen, Roringen, Ellichehausen und Hetjershausen sind dabei nicht weit von real existierenden Ortsfeuerwehren entfernt.

Szenario 16 Als Kandidatenmenge werden nur die bestehenden Feuerwehrrhäuser berücksichtigt:

- Freiwillige Feuerwehr Ellichehausen
 - Ellichehausen (75)

- Freiwillige Feuerwehr Esebeck
 - Esebeck (6)
- Freiwillige Feuerwehr Geismar
 - **Oststadt (344)**
 - Geismar (114)
- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Grone (25)
 - **Innenstadt (290)**
 - **Südstadt (369)**
- Freiwillige Feuerwehr Groß Ellershausen
 - Groß Ellershausen (2)
- Freiwillige Feuerwehr Herberhausen
 - Herberhausen (9)
- Freiwillige Feuerwehr Hetjershausen
 - Hetjershausen (2)
- Freiwillige Feuerwehr Holtensen
 - Holtensen (123)
- Freiwillige Feuerwehr Knutbühren
 - Knutbühren (28)
- Freiwillige Feuerwehr Nikolausberg
 - Nikolausberg (107)
 - **Deppoldshausen (370)**
- Freiwillige Feuerwehr Roringen
 - Roringen (64)
- Freiwillige Feuerwehr Stadtmitte
 - Weststadt (66)

– Nordstadt (333)

- Freiwillige Feuerwehr Weende

– Weende (151)

Durchschnittszeit: ca. 138 Sekunden

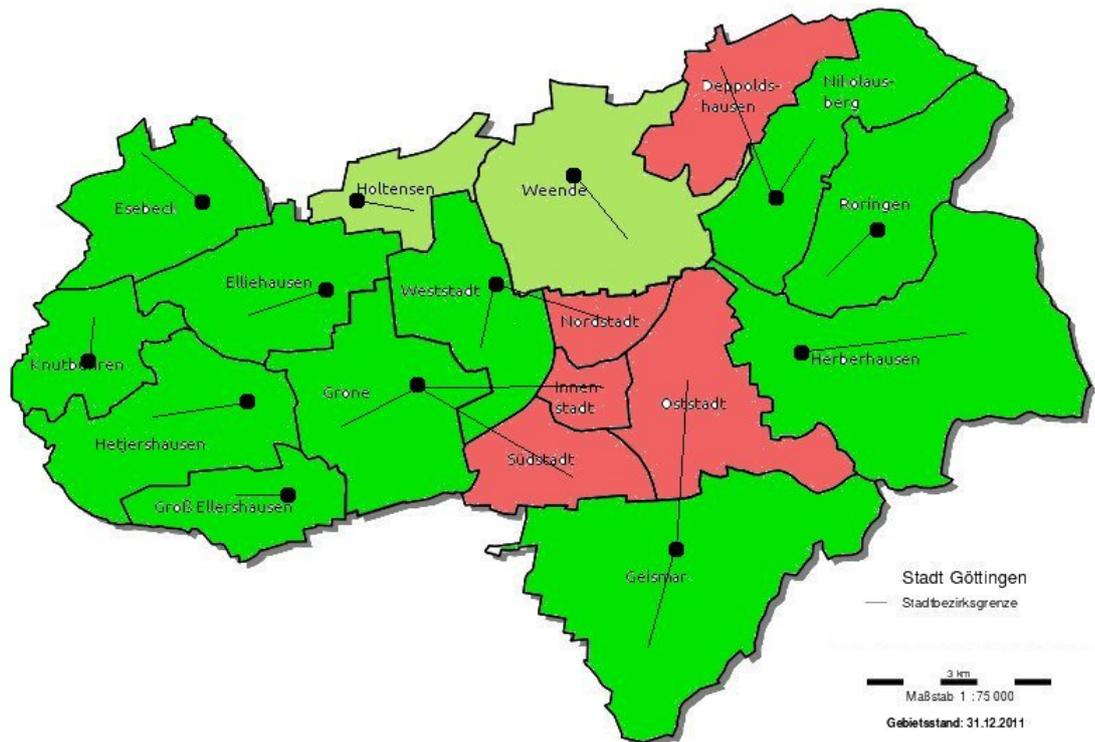


Abbildung 29: Graphische Auswertung von Szenario 16

Offenbar decken die Ortseuerwehren, wie sie jetzt verteilt sind, das Stadtgebiet sehr gut in ihren Ortsteilen ab. In den Ortsteilen, die kein Standort einer Ortsfeuerwehr sind, wird die zweite Hilfsfrist teilweise um zwei Minuten überschritten. Insbesondere ist davon die Kernstadt Göttingens unter anderem mit der Innenstadt, dem geisteswissenschaftlichen Zentrum der Georg-August-Universität und dem Bahnhof betroffen.

Ergebnis Insgesamt ist es am billigsten das Szenario 9 zu realisieren, da lediglich acht Standorte der Freiwilligen Feuerwehren benötigt werden. Man hat aber auch mit 131 Sekunden eine hohe durchschnittliche Anfahrtszeit. Dem Bürgerinteresse näher ist man dagegen natürlich mit einer niedrigen durchschnittlichen Anfahrtszeit. Das realisiert zum Beispiel das Szenario 13, bei dem auf die Standorte der Freiwilligen Feuerwehren mit einer Mindestmitgliederzahl von 35 gebaut wird und diese durch sieben Standorte erweitert wird. Hier benötigt die Feuerwehr im Schnitt eine Anfahrtszeit von 79 Sekunden, was eine deutliche Verbesserung darstellt.

7.2.2 Neun Minuten Anfahrtszeit

Szenario 17 Es ist keine Ortsfeuerwehr vorhanden. Alle Feuerwehrrhäuser können frei gewählt werden:

- Wache K1312 (Grone; 51.537348, 9.8809370)
 - Esebeck (372)
 - Knutbühren (295)
 - Hetjershausen (124)
 - Groß Ellershausen (239)
 - Elliehausen (170)
 - Holtensen (294)
 - Grone (203)
 - Weststadt (256)
 - Innenstadt (379)
 - Südstadt (451)

- Wache K1713 (B27/Faßberg; 51.553448, 9.9660370)
 - Weende (207)
 - Nordstadt (249)
 - Oststadt (315)
 - Geismar (469)
 - Herberhausen (105)
 - Roringen (216)
 - Nikolausberg (252)
 - Deppoldshausen (341)

Durchschnittszeit: ca. 274 Sekunden

Setzt man eine Anfahrtszeit von 9 Minuten voraus, lässt sich die zweite Hilfsfrist schon durch zwei Freiwillige Feuerwehren im gesamten Stadtgebiet sicherstellen. Im Schnitt werden die Ortsteile sogar nach 274 Sekunden, also knapp der Hälfte der geforderten Zeit, erreicht. Dabei handelt es sich um die beiden Standorte, die in Szenario 2, zusätzlich zur Berufsfeuerwehr in der Breslauer Straße, das 1. Schutzziel sicherstellen.

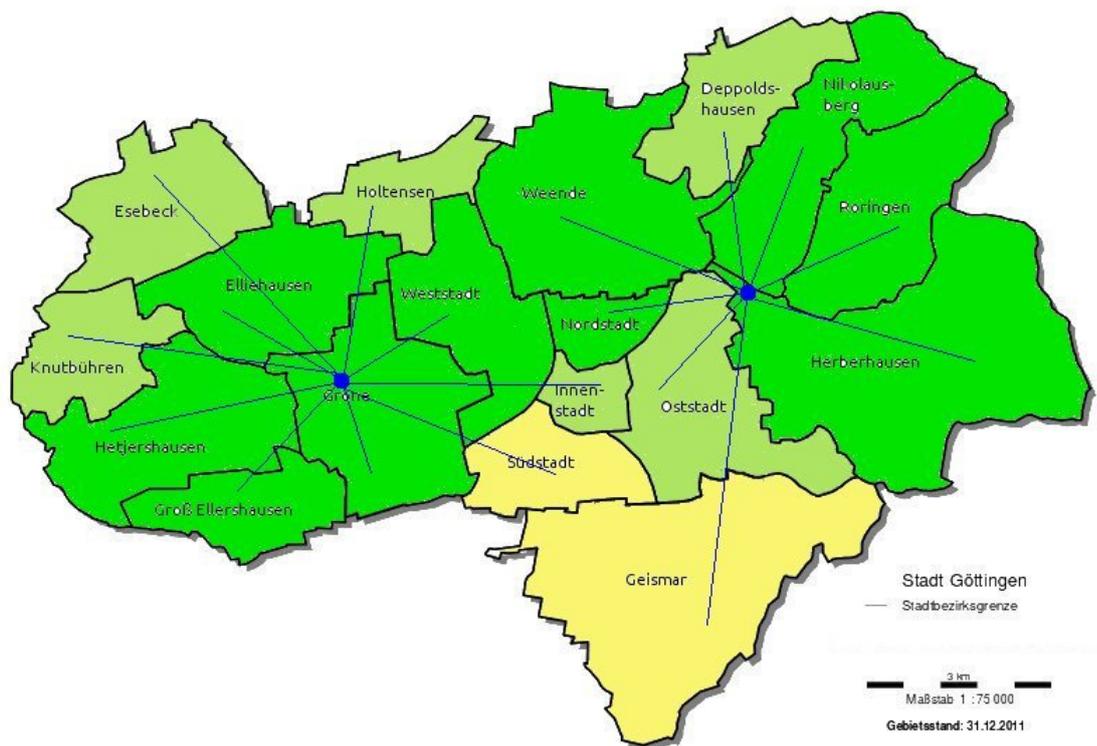


Abbildung 30: Graphische Auswertung von Szenario 17

Szenario 18 Die Feuerwehrrhäuser in Ellichehausen, Grone und Geismar sind fest:

- Wache K1713 (B27/Faßberg; 51.553448, 9.9660370)
 - Weende (207)
 - Nordstadt (249)
 - Oststadt (315)
 - Herberhausen (105)
 - Roringen (216)
 - Nikolausberg (252)
 - Deppoldshausen (341)
- Freiwillige Feuerwehr Ellichehausen
 - Eisebeck (284)
 - Knutbühren (390)
 - Hetjershausen (253)
 - Ellichehausen (75)
 - Holtensen (325)

- Freiwillige Feuerwehr Geismar
 - Geismar (114)
- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Groß Ellershausen (297)
 - Grone (25)
 - Weststadt (227)
 - Innenstadt (290)
 - Südstadt (369)

Durchschnittszeit: ca. 241 Sekunden

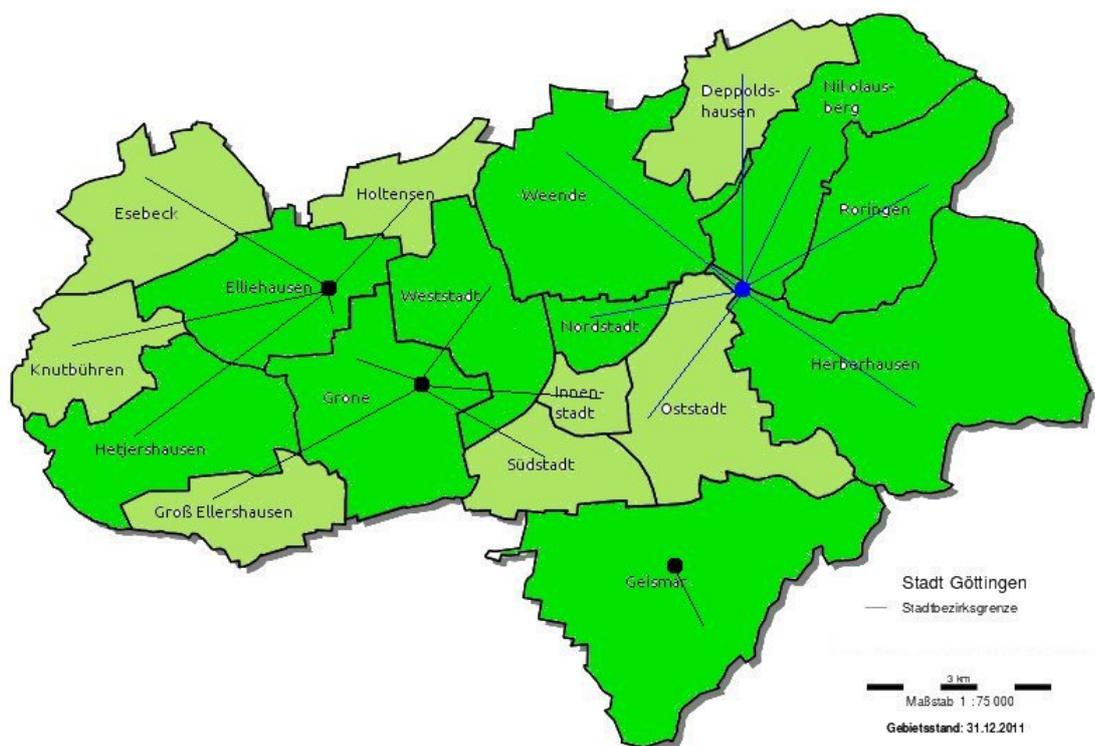


Abbildung 31: Graphische Auswertung von Szenario 18

Durch die Berücksichtigung der drei Ortsfeuerwehren Grone, Geismar und Ellichehausen wird ein weiterer Standort der Freiwilligen Feuerwehr notwendig. Optimalerweise liegt dieser, wie im vorherigen Szenario, an der B27, um den Nord-Osten Göttingens in der 2. Hilfsfrist abzudecken. Mit diesen vier Wachen kommt man auf eine durchschnittliche Anfahrtszeit von ca. 241 Sekunden und liegt damit eine gute halbe Minute unter dem Durchschnittswert des vorherigen Szenarios.

Szenario 19 Elliehausen, Grone, Geismar, Herberhausen, Weende sind fest (mindestens 35 aktive Mitglieder)

- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Esebeck (534)
 - Knutbühren (589)
 - Hetjershausen (342)
 - Groß Ellershausen (297)
 - Elliehausen (340)
 - Holtensen (380)
 - Grone (25)
 - Weststadt (227)
 - Nordstadt (404)
 - Innenstadt (290)
 - Südstadt (369)
 - Geismar (452)

- Freiwillige Feuerwehr Herberhausen
 - Weende (395)
 - Oststadt (363)
 - Herberhausen (9)
 - Roringen (281)
 - Nikolausberg (441)
 - Deppoldshausen (523)

Durchschnittszeit: ca. 348 Sekunden

Wie zu erwarten gibt es noch andere Kombinationen aus zwei Feuerwehrhäusern, die die zweite Hilfsfrist abdecken können. Dies lässt sich sogar mit zwei bereits existierenden Wachen der Freiwilligen Feuerwehr Göttingen realisieren. Die Durchschnittszeit liegt allerdings mehr als eine Minute über dem Durchschnittswert des Szenarios 17 und fast zwei Minuten über dem Durchschnittswert des vorherigen Szenarios 18.

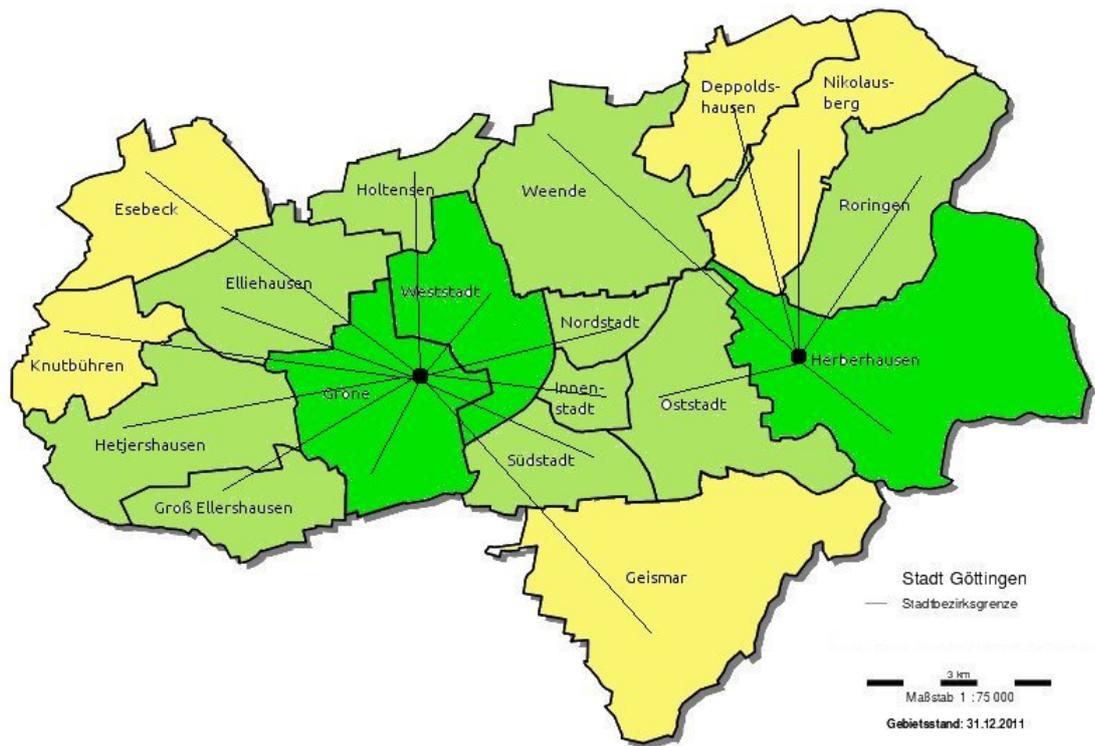


Abbildung 32: Graphische Auswertung von Szenario 19, 20 und 21

Szenario 20 Die Stützpunktfeuerwehren Geismar, Grone, Weende, Nikolausberg, Holtensen und Herberhausen sind fest:

- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Eisebeck (534)
 - Knutbühren (589)
 - Hetjershausen (342)
 - Groß Ellershausen (297)
 - Elliehausen (340)
 - Holtensen (380)
 - Grone (25)
 - Weststadt (227)
 - Nordstadt (404)
 - Innenstadt (290)
 - Südstadt (369)
 - Geismar (452)
- Freiwillige Feuerwehr Herberhausen

- Weende (395)
- Oststadt (363)
- Herberhausen (9)
- Roringen (281)
- Nikolausberg (441)
- Deppoldshausen (523)

Durchschnittszeit: ca. 348 Sekunden

Hier sind, genau wie im vorherigen und nächsten Szenario, die Standorte Herberhausen und Grone fest vorgegeben. Es ergibt sich also dreimal das gleiche Ergebnis.

Szenario 21 Als Kandidatenmenge werden nur die bestehenden Feuerwehrrhäuser berücksichtigt:

- Freiwillige Feuerwehr Grone
 - Esebeck (534)
 - Knutbühren (589)
 - Hetjershausen (342)
 - Groß Ellershausen (297)
 - Elliehausen (340)
 - Holtensen (380)
 - Grone (25)
 - Weststadt (227)
 - Nordstadt (404)
 - Innenstadt (290)
 - Südstadt (369)
 - Geismar (452)
- Freiwillige Feuerwehr Herberhausen
 - Weende (395)
 - Oststadt (363)
 - Herberhausen (9)
 - Roringen (281)
 - Nikolausberg (441)
 - Deppoldshausen (523)

Durchschnittszeit: ca. 348 Sekunden

Ergebnis Insgesamt kann die zweite Hilfsfrist bei einer Anfahrtszeit von neun Minuten mit weniger Feuerwehrhäusern realisiert werden als bei einer Anfahrtszeit von vier Minuten. Es ist sogar möglich mit zwei kompletten Neubauten der Freiwilligen Feuerwehr fast eine Durchschnittszeit von vier Minuten zu realisieren. Diese Neubauten sind die gleichen Standorte, die für die 1. Hilfsfrist als optimale neue Standorte bestimmt wurden.

8 Fehlerabschätzung

In Kapitel sieben wurden mit dem Modell aus Kapitel fünf für diverse Szenarien optimale Standorte in der Rasterebene gefunden. Nun ist es denkbar, dass die optimalen Standorte auch zwischen den Rasterpunkten liegen könnten. Dafür soll in diesem Kapitel eine untere Schranke bestimmt werden, die angibt, wie viel besser das Modell sein könnte, wenn es diese Einschränkung auf die Diskretisierung der Ebene nicht gäbe.

Dazu nennen wir zunächst den tatsächlichen optimalen Punkt, der zwischen den Rasterpunkten liegt, X_{opt} und den optimalen Punkt in der Rasterebene X_{opt}^* . Die durch das Raster beschriebene Ebene lässt sich in Quadrate benachbarter Punkte einteilen. Um X_{opt}^* liegen vier dieser Quadrate und bilden somit ein großes Quadrat. Dieses nennen wir B.

Annahme 1: Die Metrik, die dem Modell zu Grunde liegt, ist der Metrik, die die euklidische Norm auf dem \mathbb{R}^2 induziert, sehr ähnlich.

Allgemein kann man sagen, dass die Fahrzeit zu Punkten, je weiter sie von einem Ausgangspunkt entfernt liegen, umso länger wird. Ausnahmen gibt es durch Autobahnen oder Landstraßen, die aber keinen großen Effekt haben, da sie kaum im Stadtgebiet liegen. Gerade zur Autobahn gibt es im gesamten Stadtgebiet gerade mal zwei Auffahrten. Außerdem gibt es Wälder oder Einbahnstraßen, die eine direkte Fahrt nicht zulassen. Auch dieses sind Spezialfälle, die zwar vorkommen, aber eher die Ausnahme darstellen. Für die folgende Argumentation ist also die Metrik, die die euklidische Norm auf dem \mathbb{R}^2 induziert, als Grundlage zu sehen.

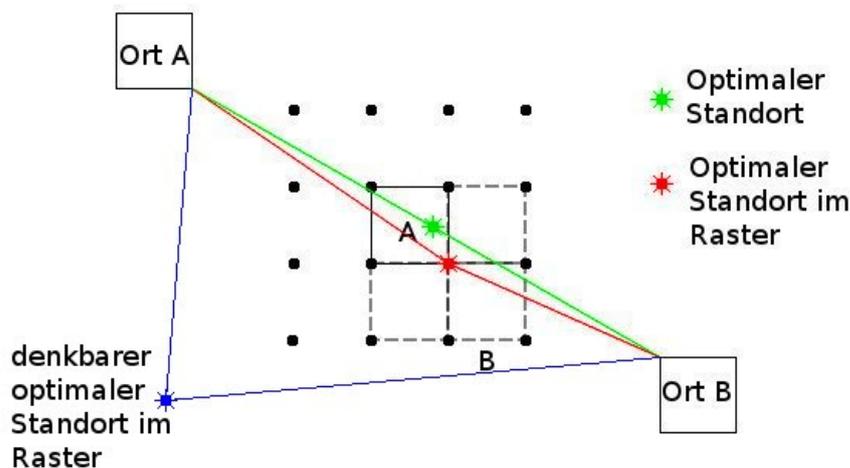


Abbildung 33: X_{opt} , X_{opt}^* und weiterer Punkt als (mögliche) optimale Standorte in den Quadraten A und B

Der optimale Punkt X_{opt} liegt irgendwo in der Ebene. Über die Lage des optimalen Standortes X_{opt}^* in der Menge der Rasterpunkte gibt es keine Aussage. Er könnte nah an X_{opt} liegen. Das ist im Beispiel von Abbildung 32 der rote Punkt. X_{opt}^* könnte wie der blaue Punkt allerdings auch weit weg liegen. Das hängt von der zu Grunde liegenden Metrik ab. Daher treffen wir folgende Annahme:

Annahme 2: X_{opt} liegt in einem der Quadrate um X_{opt}^* . Dieses nennen wir A .

Diese Annahme ist sinnvoll, da wir mit Annahme 1 jedem anzufahrenden Ortsteil I mit den Koordinaten (x_I, y_I) eine Entfernungsfunktion d_I zuordnen können, die den Abstand zu Punkt (x, y) angibt. Diese Entfernungsfunktion ist definiert durch:

$$d_I : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$$

$$d_I(x, y) = \sqrt{(x - x_I)^2 + (y - y_I)^2}$$

d_I ist konvex, da die Hesse-Matrix mit den Eigenwerten

$$\lambda_1 = 0 \text{ und}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{(x - x_I)^2 + (y - y_I)^2}} \text{ positiv definit ist.}$$

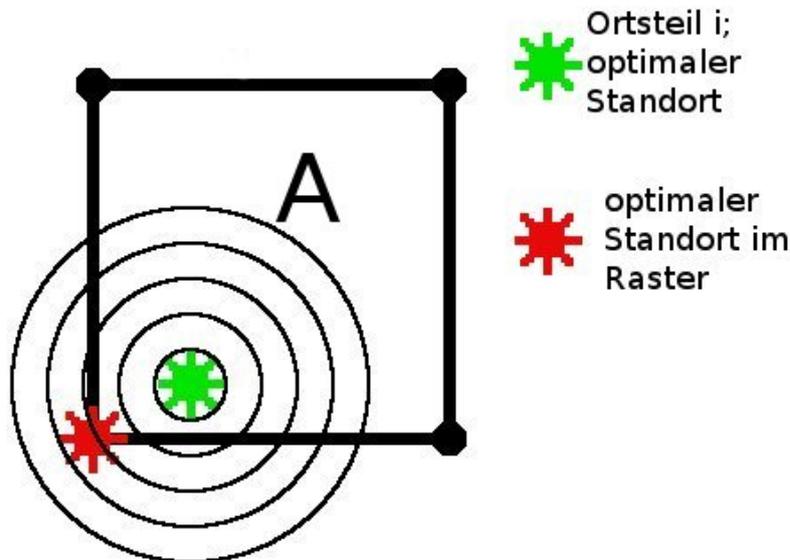


Abbildung 34: Optimaler Standort für einen Ortsteil

Für den Fall, dass es nur einen Ortsteil I gibt, ist klar, dass X_{opt} genau auf I liegt. GLPK wird als X_{opt}^* denjenigen Punkt finden, dessen Entfernung zu I am geringsten ist. Da d_I um I

kreisförmige Niveaulinien beschreibt, gibt es höchstens vier Punkte in der Rasterebene, die den geringsten Abstand zu I haben. Niveaulinien sind Mengen von Punkten für die d_I den gleichen Wert annimmt: $\{(x, y) : d_I(x, y) = k, k \in \mathbb{R}\}$. Diese höchstens vier Punkte sind die Eckpunkte des Quadrates der Rasterpunkte um X_{opt} . Dieses Quadrat nennen wir A . Der Eckpunkt von A , der X_{opt} am nächsten liegt, muss das Minimum von d_I unter allen Rasterpunkten sein und ist somit X_{opt}^* . Gibt es Eckpunkte von A , die die gleiche Entfernung zu I aufweisen, wird zufällig einer dieser Punkte als X_{opt}^* gewählt.

Es gibt allerdings auch den Fall, dass ein optimaler Standort für n Ortsteile I_j mit $j = 1, 2, \dots, n$ gesucht wird. Hier gibt es wieder einen optimalen Standort X_{opt} . Die Entfernungsfunktionen d_{I_j} der n Ortsteile I_j bilden aufsummiert die Entfernungsfunktion $D(x, y) = \sum_{I_j} d_{I_j}(x, y)$. D ist als Summe konvexer Funktionen wieder konvex und besitzt ein Minimum. Dieses Minimum ist X_{opt} . D beschreibt um X_{opt} Niveaulinien mit einer Ausdehnung in x - und y -Richtung. Je nach Verteilung der Ortsteile sind die Niveaulinien gleichmäßiger oder weniger gleichmäßig. In Kapitel sieben sieht man, dass die Ortsteile sehr gleichmäßig über die Ebene verteilt sind, sodass das die Niveaulinien um X_{opt} eine gleichmäßige Ausdehnung haben (siehe Abbildung 34).

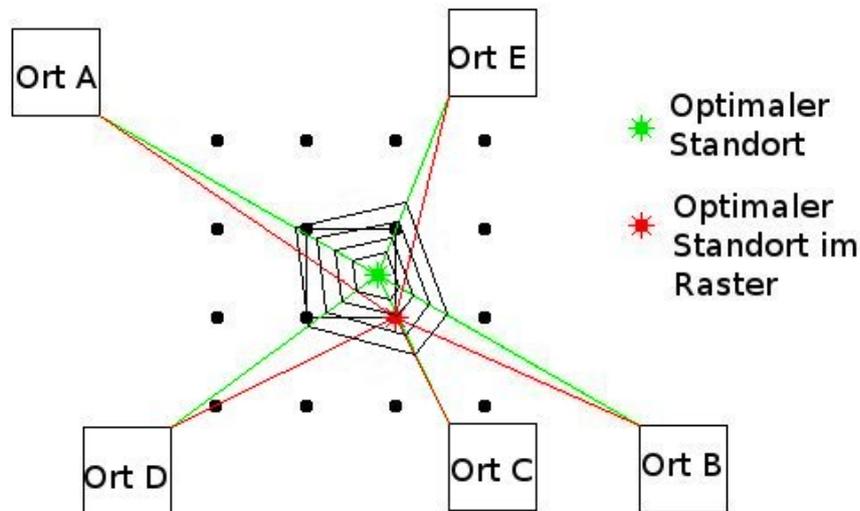


Abbildung 35: Optimaler Standort für mehrere Ortsteile

Durch die gleichmäßige Ausdehnung der Niveaulinien von D um X_{opt} ergibt Annahme 2 Sinn. Diese gleichmäßige Ausdehnung der Niveaulinien führt dazu, dass einer der vier Rasterpunkte um X_{opt} , die gleichzeitig die Eckpunkte des Quadrates A sind, eine minimale Entfernung zu I unter der Entfernungsfunktion D aufweist. Somit ist dieser Eckpunkt X_{opt}^* .

Aus diesen Erkenntnissen folgt, dass man eine untere Schranke für jede einzelne Durchschnitszeit aus Kapitel sieben berechnen kann. Dazu betrachtet man für jeden Ortsteil I wel-

cher Punkt X_{opt}^* der Kandidatenmenge diesem Ortsteil zugeordnet ist. Zu diesem X_{opt}^* betrachtet man die Eckpunkte der vier zugeordneten Quadrate, die in Quadrat B liegen. Der Eckpunkt, der am nächsten an Ortsteil I liegt, wird nun mit X_{min} bezeichnet. Der Wert von X_{min} ist, wie oben gezeigt, immer geringer als der von X_{opt}^* und X_{opt} und somit eine untere Schranke. Die Werte von X_{min} werden für jeden Ortsteil I aufsummiert und durch 18 geteilt. So erhält man für jedes Szenario eine untere Schranke.

Ist der Ortsteil I jedoch so in der Ebene gelegen, dass die kürzeste Verbindung zwischen Ortsteil I und Quadrat A orthogonal zu einer Seite des Quadrates liegt, ist die Entfernung von X_{min} zu Ortsteil I nicht in jedem Fall geringer als die Entfernung von X_{opt} zu Ortsteil I . In Abbildung 35 ist der optimale Punkt X_{opt} so gelegen, dass kein Eckpunkt von Quadrat A eine kürzere Entfernung zu Ortsteil A aufweist als die Entfernung vom optimalen Punkt X_{opt} zu Ortsteil A. Der Bereich in dem dieses Phänomen auftreten kann ist ein Kreisausschnitt. Der Mittelpunkt des Kreises ist der Ortsteil i , zu dem die Entfernung bestimmt werden soll. Im schlimmsten Fall liegt der Ortsteil i in der Mitte der Seite von Quadrat A. Dann hat der Kreis einen Durchmesser von 250 Metern und stellt einen Halbkreis dar (siehe gestrichelte Halbkreise in Abbildung 35). In diesem Fall wird von Ort A ein Lot auf die Seite von A gefällt und dessen Länge als Abschätzung genommen (orangefarbene Linie in Abbildung 35).

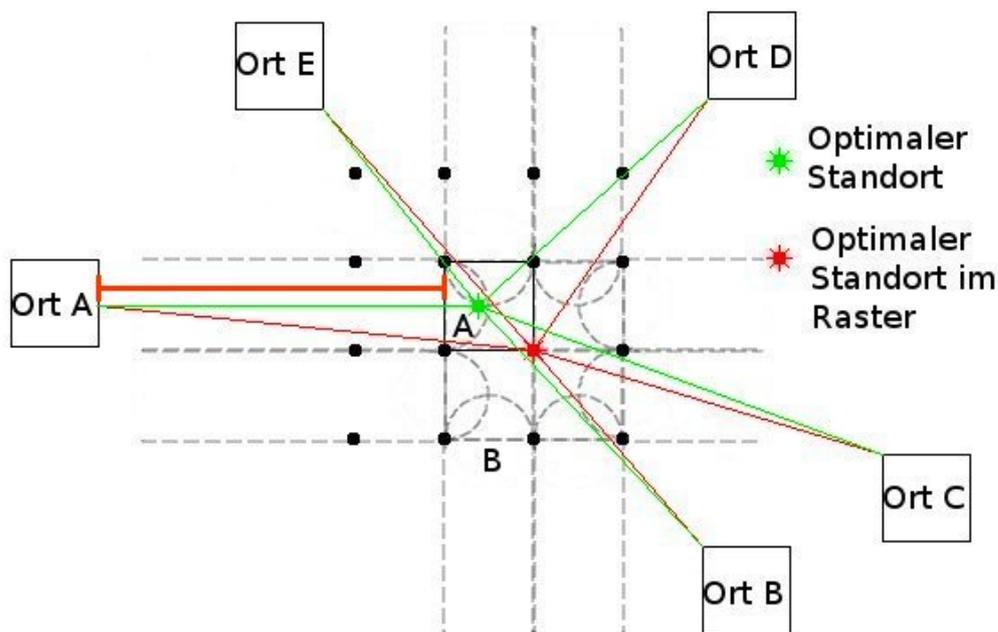


Abbildung 36: Bereiche fehlerhafter Abschätzung

Diese untere Schranke funktioniert ebenfalls nicht, wenn, wie in Abbildung 33, der optimale Standort X_{opt} genau einem Ortsteil I zugeordnet ist. Dann sind alle Eckpunkte von A schlechter als X_{opt} . X_{opt} ist in diesem Fall der Nullpunkt von d_I . Somit ist $d_I(X_{min}) = 0$ zu setzen.

8.1 Untere Schranken der Durchschnittszeiten

Auf die Ergebnisse aus Kapitel sieben angewendet, ergeben sich folgende untere Schranken (in Sekunden):

Szenario	ermittelter Durchschnittswert	untere Schranke	Abweichung	alte/neue Standorte
1	311	290	7%	1/1
2	235	217	8%	1/2
8	131	110	16%	0/7
9	117	95	19%	0/8
10	111	92	17%	4/6
11	97	84	13%	4/7
12	93	75	19%	6/6
13	79	67	15%	7/6
14	136	67	51%	6/5
15	99	74	25%	6/6
17	274	252	8%	0/2
18	241	231	4%	3/1

Diese Abschätzung bedeutet, dass die Durchschnittszeit der optimalen Standorte $X_{opt_I}^*$ im Vergleich zu den $X_{opt_I}^*$ für jedes Szenario nach unten abgeschätzt wird. Besser als diese untere Schranke können die tatsächlichen optimalen Standorte Göttingen in diesen Szenarien nicht versorgen. Es ist aber auch nicht gesagt, dass diese untere Grenze tatsächlich erreicht werden kann.

Man sieht, dass die Standorte, die GLPK als optimale Standorte bestimmt hat, umso besser sind, je weniger Standorte bestimmt wurden. In den Szenarien 8 bis 15 geht es um die 2. Hilfsfrist der Freiwilligen Feuerwehr. Hier bedienen die optimalen Standorte in der Regel ein bis vier Ortsteile, somit werden mehr Standorte der Feuerwehr benötigt. Die Standorte liegen dann sehr nah an den Ortsteilen, so dass es sich umso stärker bemerkbar macht, wenn man die Entfernung nun mit X_{min} abschätzt.

Bei den Szenarien 1, 2, 17 und 18 ist die Abweichung im einstelligen Prozentbereich und somit ist der gefundene Punkt als gut zu bewerten. Bis auf Szenario 14 sind alle anderen Abweichungen im Bereich von höchstens 25%. Auch das ist im Rahmen. Szenario 14 ist mit einer Abweichung von 51% ein Sonderfall, der möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass es sich hier nun nicht um den \mathbb{R}^2 versehen mit der Metrik, die durch die euklidische Norm induziert wird, handelt, sondern um die reale Welt, in der es Autobahnen und Wälder gibt, die Unregelmäßigkeiten schaffen. Eventuell kommt auch hier zum Tragen, dass auf diese Art der Abschätzung, wie oben beschrieben, bei einer hohen Anzahl von Standorten die untere Schranke nur sehr grob bestimmt werden kann.

9 Fazit

Der Feuerwehrbedarfsplan 2013 hat festgestellt, dass der Erreichungsgrad mit 52% viel zu gering ist und selbst Lösungen, vor allem im Bereich der ersten Hilfsfrist, vorgeschlagen. Daraus resultierte die Idee für diese Bachelorarbeit, in der, losgelöst von Fragen der Finanzierung und Praktikabilität für die Einsatzkräfte, eigene Lösungen mit den Mitteln der Linearen Optimierung bestimmt werden sollten.

Dazu wurde ein Modell aufgestellt, das optimale Lösungen für die Standorte der Wachen bestimmt. Diese Lösungen wurden dabei in Abhängigkeit von der Anfahrtszeit von über 2000 möglichen Kandidaten in die 18 Ortsteile Göttingens und in Abhängigkeit von bestimmten Gewichtungen der einzelnen Ortsteile ermittelt. Mit der Software GLPK konnten die verschiedenen Szenarien gelöst werden.

Beim Betrachten der Ergebnisse fallen vor allem folgende Dinge auf:

- Der Feuerwehrbedarfsplan 2013 schlägt als Lösung für die 1. Hilfsfrist einen weiteren Standort der Berufsfeuerwehr im Bereich nördlich der Hermann-Kolbe Straße vor. GLPK benennt als Optimallösung für Szenario 1 einen weiteren Standort der Berufsfeuerwehr wenige hundert Meter weiter südlich. Hier kommen also beide Herangehensweisen zum nahezu gleichen Ergebnis. Bedenkt man nun die Lage des Vorschlags der Feuerwehr, ist es sogar möglich, dass dieser Vorschlag am Ende besser ist, als derjenige, den GLPK berechnet hat. Der Standort an der Hermann-Kolbe-Straße würde bei einem Bau vermutlich einen eigenen Zugang zur Autobahn bekommen, der die Anfahrtszeiten in gewisse Bereiche Göttingens verringert. Diese Gedankenspiele lassen sich mit der Herangehensweise aus dieser Bachelorarbeit nicht weiterverfolgen, da hier nur mit bereits vorhandener Infrastruktur gearbeitet wird.
- Die beiden optimalen Standorte aus Szenario 2 und 17 liegen in nicht bebautem Gebiet. Der optimale Standort im Westen Göttingens liegt im Bereich einer Bundesstraße und einer Bundesautobahn. Der optimale Standort im Nord-Osten liegt im Bereich einer Bundesstraße und in unmittelbarer Nähe zum Nordbereich der Georg-August-Universität. Darüberhinaus sind das Sportinstitut der Georg-August-Universität und die großen Krankenhäuser Evangelisches Krankenhaus Göttingen-Weende und das Universitätsklinikum Göttingen in der Nähe. Durch gezielte Wahl von Baugrundstücken ist es möglich die Infrastruktur derart zu ändern, dass diese Strukturen schneller angefahren und insgesamt noch bessere Durchschnittszeiten erzielt werden können.
- Die Freiwillige Feuerwehr ist in der zweiten Hilfsfrist je nach Betrachtungsweise entweder mit sehr gut oder gebietsweise mit ungenügend zu bewerten. Bei einer Anfahrtszeit zum Einsatzort von neun Minuten ist in Göttingen das zweite Schutzziel hervorragend erreicht. Die Selbsteinschätzung der Ortsfeuerwehren im Rahmen des Feuerwehrbedarfs-

planes 2013 zeigt aber, dass man nicht davon ausgehen kann, dass die Ortsfeuerwehren jederzeit garantieren können, dass entsprechende Einsatzkräfte innerhalb von vier Minuten nach Alarm im Feuerwehrhaus bereit zum Ausrücken in den Einsatz stehen. Setzt man eine Anfahrtszeit von vier Minuten zum Einsatzort mit einer neunminütigen Anfahrtszeit nach Alarmierung zum Feuerwehrhaus voraus, sind die Ortsteile mit eigener Ortsfeuerwehr sehr gut geschützt, alle anderen Ortsteile aber nicht. Insbesondere ist davon die Kernstadt Göttingens unter anderem mit der Innenstadt, dem geisteswissenschaftlichen Zentrum der Georg-August-Universität und dem Bahnhof betroffen.

- Auf Grund des Ergebnisses aus Szenario 18 scheint es sinnvoll die Möglichkeit der Doppelmitgliedschaft in den Ortsfeuerwehren voranzutreiben, um die Selbsteinschätzung der Ortsfeuerwehren zu verbessern. In Szenario 18 sind Elliehausen, Grone, Geismar und ein neuer Standort an der B27 im Bereich des Faßbergs optimale Standorte. In der Selbsteinschätzung gaben die Ortsfeuerwehren Geismar und Weende an, dass sie derart leistungsstark sind, jederzeit vier Minuten nach Alarmierung bereit zum Ausrücken zu stehen. Der Standort der Ortsfeuerwehr Weende steht zur Diskussion. Möglicherweise kann man ihn weiter Richtung Süd-Osten verlegen, um in die Nähe des, in Szenario 18 bestimmten, optimalen Standortes zu gelangen und somit für den Nord-Osten das 2. Schutzziel zu sichern. Durch eine Doppelmitgliedschaft ist es sicherlich möglich die beiden Standorte und zusätzlich die Ortsfeuerwehr Grone zu stärken, sodass auch Grone die Leistung bringen kann.
- Trotz vier zum Teil grundverschiedenen Risikobewertungen kommt immer das gleiche Ergebnis heraus. Das ist besonders interessant, wenn man bedenkt, dass es in zwei Szenarien nur die Oststadt war, die nicht ausreichend abgedeckt war. Die Oststadt hat aber in drei von vier Risikobewertungen einen höheren Stellenwert als Gebiete die sogar sehr gut abgedeckt werden.

Zu bedenken ist noch, dass diese Bachelorarbeit im Vergleich zum Feuerwehrbedarfsplan 2013 einen grundverschiedenen Weg zur Bestimmung der optimalen Standorte einschlägt. Der Feuerwehrbedarfsplan 2013 betrachtet mit www.openstreetmap.de, wie weit man von den jeweiligen vorhandenen Feuerwehrhäusern der Ortsfeuerwehren oder der Berufsfeuerwehr in einer bestimmten Zeit kommt und legt ein Polygon um die Standorte. Dadurch wird graphisch die Fläche bestimmt, die in der vorgegebenen Zeit erreicht werden kann.

Die Bachelorarbeit betrachtet eine Vielzahl von Kandidaten und versucht einige davon so über die Stadt zu verteilen, dass die durchschnittliche Anfahrtszeit in die einzelnen Ortsteile minimiert ist. Dabei wurde jeder Ortsteil auf einen Punkt diskretisiert. Von jedem Kandidaten wurde zu jedem dieser 18 Punkte die Entfernung bestimmt. Es ist also zu beachten, dass die angegebene Zeit nicht die Zeit widerspiegelt, die benötigt wird, um jeden Teil des jeweiligen Ortsteiles anzufahren. Gerade bei flächenmäßig großen Ortsteilen ist es möglich, dass die

berechneten Standorte diese Ortsteile nicht komplett abdecken, wenn sie in der Auswertungsgraphik mit gelb eingefärbt wurden.

Fest steht, es muss etwas getan werden. Diese Bachelorarbeit liefert mit den Ergebnissen der unterschiedlichen Szenarien aus Kapitel sieben eine Grundlage für Gedankenspiele in ganz verschiedene Richtungen.

Literatur

- [1] Google Developers. <https://developers.google.com/maps/documentation/distancematrix/?hl=de>, Stand: 12.08.2013.
- [2] Z. Drezner and H.W. Hamacher. *Facility Location: Applications and Theory*. Springer, 2004.
- [3] Bergische Universität Wuppertal Fachbereich Mathematik. <http://www.matheprisma.uni-wuppertal.de/module/stopt/index.htm?15>, Stand: 21.10.2013.
- [4] GNU. <http://www.gnu.org/software/glpk/>, Stand: 14.10.2013.
- [5] Feuerwehr Göttingen. *Feuerwehrbedarfsplan 2013*. Göttingen, 2013.
- [6] Kathrin Klamroth. Standortprobleme, oder: Was haben feuerwehr, baustellen und kinderspielplätze gemeinsam? Universität Erlangen-Nürnberg.
- [7] Branddirektion Landeshauptstadt Stuttgart. *Feuerwehrbedarfsplan für die Landeshauptstadt Stuttgart*. Stuttgart, 2011.
- [8] Universität Klagenfurt Markus Buchtele. http://optimierung.mathematik.uni-kl.de/-mamaesch/aktivitaeten/lehrerfortbildung/austria_teacher_tr_standort.pdf, Stand: 21.10.2013.
- [9] mathematik.de. <http://www.mathematik.de/ger/fragenantworten/ersthilfe/lineareoptimierung/lineareoptimierung.html>, Stand: 08.08.2013.
- [10] Westfälische Wilhelms-Universität Münster Prof. Dr. van Suntum. http://www.wiwi.uni-muenster.de/insiwo/download/vorlesung/roe1_0607/4.1.weberschestandorttheorie.pdf, Stand: 21.10.2013.
- [11] Wikipedia. http://de.wikipedia.org/wiki/lineare_optimierung, Stand: 19.08.2013.
- [12] Wikipedia. <http://de.wikipedia.org/wiki/fermat-punkt>, Stand: 21.10.2013.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Göttingen, den 24. Oktober 2013