



**Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg**
University of Applied Sciences



**Internationales Zentrum
für Nachhaltige Entwicklung**
*International Centre for
Sustainable Development*



**Institut für Technik
Ressourcenschonung
und Energieeffizienz**

Methodische Grundlegung für eine Strategie zum sukzessiven Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektromobilität in Bonn und dem Rhein- Sieg-Kreis

Studie zur Strategie für den Ausbau der Ladeinfrastruktur im Hin-
blick auf E-Autos und E-Zweiräder

Koordinator:

Prof. Dr. Stefanie Meilinger
Internationales Zentrum für Nachhaltige Entwicklung
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg

Autoren: Alexander Hagg, Helge Spieker, Alexander Oslislo, Dr. Volker Jacobs,
Prof. Dr. Alexander Asteroth, Prof. Dr. Stefanie Meilinger

Datum: 30.06.2015

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Übersicht über mögliche Strategien zum sukzessiven Aufbau von Ladeinfrastruktur für Elektromobilität	5
2.1	Lösungsansätze in anderen Stadtregionen	5
2.2	Sukzessive Optimierungsalgorithmen als Teil einer Lösungsstrategie	9
2.2.1	Problemformalisierung	9
2.2.2	Strategien.....	10
3	Entwicklung einer Strategie für die Region Bonn- Rhein-Sieg.....	12
3.1	Verfahrensauswahl.....	12
3.1.1	Zweistufige Vorgehensweise	12
3.1.2	Optimierungsverfahren	13
3.2	Datengrundlage der vorliegenden Studie	14
3.2.1	Berücksichtigte Standortoptionen	14
3.2.2	Berücksichtigung von Verkehrsdaten.....	16
3.2.3	Festlegung der Ausbauziele.....	20
3.2.4	Datenverfügbarkeit.....	21
3.3	Detailanalyse als Methode der Nachprozessierung.....	23
4	Ergebnisse der algorithmischen Standortoptimierung	27
4.1	Elektroautos	27
4.1.1	Ohne Verkehr.....	27
4.1.2	Mit Verkehr.....	27
4.2	Elektrofahrräder.....	28
4.2.1	Ohne Verkehr.....	28
4.2.2	Mit Verkehr.....	28
4.3	Diskussion	29
5	Ergebnisse der exemplarischen Detailanalysen	30
5.1	Beispiel Bonn-Innenstadt.....	30
5.2	Beispiel Königswinter	31
6	Diskussion und Ausblick.....	33
6.1	Einschätzung der Ergebnisse	33
6.2	Ausblick.....	36
7	Anhang.....	39
7.1	Literaturverzeichnis	39

7.2	Bewertungsmatrix des Masterplan Hamburg.....	46
7.3	Weitere Aspekte der Detailplanung.....	47
7.3.1	Weitere Aspekte der Standortwahl	47
7.3.2	Aspekte für die Wahl einer geeigneten Ladestation	50
7.4	Vollständiges idealisiertes Raster.....	51
7.4.1	E-Auto.....	51
7.3.2	E-Bike	53

1 Einleitung

Aufgrund eines nahezu gleichlautenden Beschlusses des Kreistages im Rhein-Sieg-Kreis (RSK) und des Hauptausschusses der Stadt Bonn im Jahr 2011 wurden die jeweiligen Verwaltungen beauftragt, gemeinsam mit den Energieversorgern der Region ein Starthilfekonzert Elektromobilität zu entwickeln. In Folge dieses Beschlusses konstituierte sich Ende 2011 ein Arbeitskreis, der aus den Verwaltungen des Rhein-Sieg-Kreises und der Stadt Bonn, den Energieversorgern SWB Energie und Wasser, der Rhenag, den Stadtwerken Troisdorf, der Rheinenergie und den RWE besteht. Die inhaltlichen Schwerpunkte, die inzwischen in drei Arbeitskreisen behandelt werden, umfassen den Ausbau der Ladeinfrastruktur, die Öffentlichkeitsarbeit und die Bereitstellung von Strom aus regenerativen Quellen durch den Zubau entsprechender Anlagen in der Region. Während Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und die Bereitstellung Grünen Stroms aus den Arbeitskreisen direkt bearbeitet und bewegt werden, ist dies aufgrund der Komplexität des Themas und der zahlreichen Einflussgrößen beim Ausbau der Ladeinfrastruktur nicht möglich. Daraus entstand die Überlegung einer Kooperation mit der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg.

Grundlage für die vorliegende Auftragsarbeit ist eine aktuelle Erhebung zu existierenden Ladestellen in Bonn und dem RSK sowie die sog. Points of Interest (POIs) (Touristische Ziele, Freizeitangebote, etc.) und die Park-&-Ride-Plätze als mögliche Standorte für Ladeinfrastruktur. Auf der Basis dieser Erhebung entwickelt die vorliegende Studie eine Strategie für den Ausbau der Ladeinfrastruktur im Hinblick auf E-Autos und E-Bikes. Hierzu werden bereits erfolgreich umgesetzte Ladeinfrastruktur-Konzepte in vergleichbaren Regionen berücksichtigt und auf ihre Anwendbarkeit für die Region Bonn-Rhein-Sieg hin untersucht. Die Strategieentwicklung beinhaltet insbesondere die Bildung eines Optimierungsalgorithmus zur Bestimmung eines Rasters für den sukzessiven Aufbau einer Ladeinfrastruktur in Bonn und dem Rhein-Sieg Kreis, die die spezifischen Unterschiede und Ausgangssituationen im Flächenkreis Rhein-Sieg-Kreis und im Ballungsraum Stadt Bonn bzgl. Mobilitätsverhalten und möglichen Verknüpfungspunkten berücksichtigt. Darüber hinaus wird ein Planungsleitfaden für die Berücksichtigung weiterer Restriktionen im Rahmen einer exemplarischen Detailanalyse als Postprocessing-Methode für die Wahl einzelner vorab durch die Optimierung identifizierter Standorte entwickelt.

2 Übersicht über mögliche Strategien zum sukzessiven Aufbau von Ladeinfrastruktur für Elektromobilität

2.1 Lösungsansätze in anderen Stadtregionen

In der ersten Projektphase wurden vorhandene E-Mobility-Projekte insbesondere in Deutschland zusammengetragen und näher betrachtet. Die nachfolgende Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, jedoch zeigen die angeführten Projekte die wesentlichen Unterschiede der Planung auf.

Vorrangig unter den Projekten in Deutschland (s.u.) scheint der Betrieb von Flottenfahrzeugen zu sein (egal ob im Car-Sharing-Betrieb oder als Fahrzeugflotten privater oder öffentlicher Unternehmen), die primär auf dem Einsatz identischer Fahrzeugtypen und dem Betrieb fester Ladestationen am Betriebsstandort aufbauen. Beim Car-Sharing innerhalb von Ballungszentren wird generell angenommen, dass ein Flottenfahrzeug ca. 8 private PKW ersetzt. Hierdurch ergibt sich ein verringertes Aufkommen an motorisiertem Individualverkehr (MIV) als auch ein verringerter Platzbedarf. Da der Fokus unseres Projektes auf der Suche von Standorten für die Ladeinfrastruktur der E-Mobilität im öffentlichen Raum basiert, sind Fahrzeugflotten privater und öffentlicher Unternehmen eher von nachrangiger Bedeutung.

Innerhalb des Landes Nordrhein-Westfalen wurden durch die Landesregierung drei Kompetenzzentren gebildet, die die Elektromobilität in ihren Bereichen Batterie (Uni Münster), Fahrzeugtechnik (RWTH Aachen) sowie Infrastruktur & Netze (TU Dortmund) voranbringen soll, wobei der Forschungsschwerpunkt an der TU Dortmund in der Netztechnik und weniger in der Positionierung von Ladepunkten liegt. Für die vorliegende Studie ist der Fokus jedoch eindeutig auf der Optimierung der Ladesäulenverteilung.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung hat für das Jahr 2011 einen deutschlandweiten Überblick mit Modellregionen zur systematischen Entwicklung einer Ladeinfrastruktur im Rahmen der Elektromobilität veröffentlicht. In den beteiligten Regionen wurden folgende Fahrzeuge und Ladepunkte eingesetzt:

FAHRZEUGE UND LADEPUNKTE IN DEN MODELLREGIONEN										
ERGEBNISSE DER PROJEKTKONSORTIEN IN DEN MODELLREGIONEN										
	Berlin/ Potsdam	Bremen/ Oldenburg	Hamburg	München	Rhein-Main	Rhein- Ruhr	Sachsen	Region Stuttgart	Überregionale Technologieprojekte	Gesamtergebnis
Fahrzeugsegmente										
Busse		2	5	1	5	21	20	5		59
Nutzfahrzeuge	5	3	50		12	31		77	65	243
Pkw	53	80	268	66	40	93	35	16	230	881
Motorräder / E-Scooter		10			12	28	8	635		693
Pedelecs	20	6			421	2	3	91	57	600
Gesamt	78	101	323	67	490	175	66	824	352	2.476
Ladepunkte										
Öffentlich	42		100	77	158	228	48	183		836
Halböffentlich	14	112	21	48	10	207	66	2	8	488
Privat	7	99	98	44	89	96	34	64	80	613
Gesamtergebnis	63	211	219	169	257	531	148	249	88	1.935

Abb. 1: Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011), S. 19

Die übergeordneten Ziele der Förderung der Elektromobilität in den Modellregionen waren:¹

- Technologieoffene Forschung und Entwicklung (F&E) bei batterieelektrischen Fahrzeugen
- Alltags- und nutzerorientierte Demonstration
- Integration in die Mobilitäts-, Raum- und Stadtentwicklung
- Lokale Vernetzung der Akteure aus relevanten Industrien, Wissenschaft und öffentlicher Hand
- Ergebnisorientierter Austausch in übergeordneten Plattformen

Bis 2014 wurden hinsichtlich der Implementierung von Ladeinfrastruktur-Systemen in den Modellregionen folgende theoretische Verfahren entwickelt, die sich anhand von Fragestellungen nach der Anzahl der aufzubauenden Ladepunkte, ihrer Standorte und Verortung, der Technik (z.B. AC- oder DC-Laden), den Nutzergruppen bzw. Anwendungsfällen sowie dem zeitlichen Horizont bzw. der Zukunftssicherheit der Infrastruktur beschreiben lassen. Im Folgenden werden einzelne Beispiele kurz vorgestellt:

Berlin (Bedarfsgerechte Bereitstellung von Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge)

Bei diesem Projekt handelt es sich um ein parametrisiertes Verfahren auf der Basis von Erfahrungen und Erkenntnissen von Flex-Car-Sharing-Betreibern und Annahmen. Es werden Stadträume identifiziert, in denen ein Bedarf an Lademöglichkeiten für spezielle Nutzungsprofile erwartet wird. Voranalysen haben ergeben, dass für das Stadtgebiet vor allem der Betrieb von großen Car-Sharing-Flotten mit Elektrofahrzeugen zu erwarten ist. Für die Planung wurde die Gesamtstadt in 192 statistische Gebiete mit 1200 Verkehrsbezirken eingeteilt, in welchen eine Standortplanung auf Mikroebene durchgeführt wurde. Voraussetzung für die Implementierung sind die Verfügbarkeit der

¹ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011), S. 29

empirischen Verkehrsdaten sowie Kenntnisse über Betreibermodelle von E-Fahrzeugflotten (z.B. Geschäftsgebiet der Car-Sharing-Unternehmen). Eine genaue Verortung (Straßenzug + Platz) liegt in der Verantwortung der Kommune/nachgelagerter planerischer Tätigkeiten. Das Verfahren ist vor allem für Ballungsräume geeignet und sicherlich auf andere Großstädte und auch Nutzergruppen (außerhalb des Car-Sharing) anwendbar. *(Quelle: BMdl, S. 54-66)*

Göppingen (EMIS – Elektromobilität im Stauferland)

Hierbei handelt es sich um ein Projekt zum Aufbau von Elektromobilität in Mittelzentren. „Das Konzept der „Elektromobilen Quartierstypologie“ soll eine Abschätzung der Potenziale und Erfordernisse der Elektromobilität nach Quartieren differenziert leisten und durch die Identifikation von typischen Quartiersstrukturen auch eine Übertragbarkeit auf andere Städte ermöglichen.“ Innerhalb der Quartierstypologie werden bspw. Ein- und Mehrfamilienhäuser, Geschosswohnungsbau oder im innerstädtischen Bereich Baublöcke und Gebäude inkl. Nutzung und Höhe unterschieden. Anschließend erfolgen die Vorschläge für Ladepunkte. Diese umfassen einerseits, unabhängig von der Quartierstypologie, „zentrale“ Vorschläge für Standorte der Ladeinfrastruktur (Krankenhäuser, Bildungszentren, POI etc.), andererseits werden in Abhängigkeit von der Gebietsstruktur in Abhängigkeit von der Auslastung der Ladepunkte Nutzergruppen (Anwohner, Beschäftigte, Besucher, Intermodale) und deren Nutzungspotentiale (Wohnen, Arbeiten, Freizeit, Intermodal) unterschieden. Das Verfahren eignet sich gut zur Übertragung auf ähnlich große Kommunen. Für die Umsetzung sind ausreichend Personalkapazitäten einzuplanen. *(Quelle: BMdl, S. 60-68)*

Dortmund (Metropol-E, „Siedlungsorientiertes Modell für Nachhaltigen Aufbau und Förderung der E-Ladeinfrastruktur“ (SIMONE))

In diesem Projekt geht es vorrangig um eine Gebietstypisierung mit gleichzeitiger Strukturierung der finanziellen Förderung sowie Zuordnung von Verkehrszellen zu den jeweiligen Gebietstypen. Es wird davon ausgegangen, dass in unterschiedlichen Gebietstypen unterschiedliche Bedarfe vorhanden sind. Die durch das Verfahren gewonnenen Daten sollen auf andere Kommunen übertragbar sein. Planzahlen des Bundes für Ladepunkte werden auf kleinere Gebietseinheiten anhand einer zu erstellenden Formel/Regel heruntergebrochen. Im Vordergrund steht die Versorgungssicherheit. Bis auf die Ebene Verkehrszelle wird die Bedarfsermittlung als einfach angenommen. Die anschließenden Verortungsprozesse (Straßenzug + Platz) sind nicht Bestandteile der Methode und müssen durch nachgelagerte planerische Prozesse in der Kommune bedient werden. Das Verfahren wurde noch nicht erprobt. *(Quelle: BMdl, S. 50-64)*

Hamburg (Masterplan)

In diesem Projekt geht es vorrangig um die Planung der konkreten Umsetzung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur bis Mitte 2016. Hierzu werden Abschätzungen als Planungsgrundlage mit empirischen Befunden abgeglichen. Empirische Grundlagen sind die tatsächlichen Auslastungszahlen der in Hamburg bereits im Betrieb befindlichen Ladesäulen. Planungsgrößen und Zielzahlen der geplanten oder be-

reits in der Umsetzung befindlichen E-Mobility-Projekte werden auf der Basis von empirisch begründeten Abschätzungen zu Fahr- und Ladeverhalten und auf der Grundlage von Annahmen zur zahlenmäßigen Verteilung der fahrzeugseitigen Ladetechnik durchgeführt. Die Standortsuche erfolgt anhand einer Kriterien-basierten Auswahl und Bewertung potentieller Standorte durch die Einteilung nach "Ausschlusskriterien" und "vergleichenden Kriterien". "Methodisch werden ausgewählte Bewertungsparameter in einer Matrix zusammengefasst und einheitlich für alle identifizierten Flächen zur Anwendung gebracht. Ein Teil dieser Parameter sind Ausschlusskriterien. Beispiele hierfür sind Verstöße oder sonstige Inkompatibilität in Bezug auf spezifische Schutznormen (Denkmalschutz, Grünanlagenverordnung, Binnenaltsterverordnung) sowie geltendes Planungsrecht (Flächennutzungspläne, Bebauungspläne) oder straßenverkehrsbehördliche Anordnungen (Fußgängerzonen, Ladezonen, etc.). Faktische Ausschlussgründe können auch technisch bedingte Probleme (Statik, fehlende Netzan schlüsse) sein, sofern sie gar nicht oder nur mit unvertretbarem finanziellen Aufwand behoben oder überwunden werden können." Es erfolgt eine prozessbegleitende Evaluation und Aktualisierung der Szenarien zu Fahrzeughochlauf und Ladeinfrastrukturbedarf mit Hilfe der entwickelten Methodik. Das Verfahren ist gut übertragbar/skalierbar auf andere Raumeinheiten und Nutzergruppen. (Quelle: *BMDI*, S. 58-66)

Die näher betrachteten Modellregionen zeigen grundlegende Unterschiede der Herangehensweise für die Positionierung von Ladepunkten einer Ladeinfrastruktur auf. Weitere Projekte können der Literaturliste im Anhang entnommen werden.

Zu beachten ist, dass die Planung bei allen Projekten theoretisch und oder anhand der Auswertung einer relativ kleinen Nutzergruppe erfolgt. Die Messung des Nutzungsgrades von Elektromobilität anhand von Zahlungsbereitschaften unterschiedlicher Technologien wird nicht abgebildet. Bei den weiteren Projekten kann eine Gliederung nach Raumeinheit vorgenommen werden. Hierbei scheinen Projekte in Ballungszentren gegenüber solchen im ländlichen Raum oder dem Übergangsbereich von Stadt zu Peripherie deutlich zu überwiegen. Insbesondere scheint es bisher nur eine begrenzte Anzahl an Studien mit Orientierung an Stadt-Umland-Pendlern in vergleichbaren Regionen zum Raum Bonn-Rhein-Sieg zu geben. Aus dem benachbarten Ausland wurden v.a. Standorte in Österreich und den Niederlanden identifiziert.

Die aus den betrachteten Pilotprojekten gewonnenen Erkenntnisse wurden dahingehend ausgewertet, inwieweit sie auf die spezifische Struktur der Stadtregion Bonn-Rhein-Sieg übertragen werden können. So wurde aus der Dortmunder Studie das Vorgehen übernommen, die genaue Verortung (Straßenzug + Platz) in einen nachgelagerten planerischen Prozess in der Kommune zu verlagern. Anders als in Dortmund beruht der vorgelagerte Prozess auf einem sukzessiven Optimierungsalgorithmus, der die optimale Verteilung von Ladestationen auf der Basis von Verkehrsdaten und vorab identifizierten und gewichteten Standortoptionen (POIs, ÖPNV-Umstiegsunkte, Park-&-Ride-Plätze, etc.) bestimmt und sich nur in den Absolutzahlen an den Plandaten des Bundes orientiert. Für das planerische "Postprozessing" im Rahmen der nachgelagerten Detailanalyse wurde auf die Erkenntnisse des Masterplans Hamburg zurückgegriffen.

2.2 Sukzessive Optimierungsalgorithmen als Teil einer Lösungsstrategie

2.2.1 Problemformalisierung

Je nach Auswahl der Priorisierungskriterien für potentielle Standorte für Ladesäulen, kann die Verteilung von Ladestationen auf unterschiedliche Art und Weise formalisiert werden. Dabei ist die Problemformalisierung die Voraussetzung zur Bestimmung der am besten geeigneten informationstechnologischen Lösung für eine optimierte Verteilung der Ladeinfrastruktur. Zunächst werden zwei Formalismen beschrieben, die sich für die Verteilung von Ladestationen eignen.

Maximal Coverage Location Problem

Das Maximal Coverage Location Problem (MCLP) umschreibt die Aufgabe, eine fixe Anzahl an Ladestationen so zu platzieren, dass eine maximale Anzahl an Bedarfspunkten abgedeckt ist (Church & ReVelle (1974)). Als abgedeckt zählen dabei alle Bedarfspunkte innerhalb eines gewissen Radius (z. B. 300 m) um die Ladestation. Die Umsetzung des MCLP benötigt relativ wenige Daten, die im Rahmen des Projekts verfügbar sind.

Andererseits hat das MCLP für die Modellierung der Ladeinfrastruktur den Nachteil, dass es ein statisches Problem ist. Es werden keine Kapazitätsgrenzen, Warteschlangen oder dynamische Verkehrsflüsse innerhalb der Problemmodellierung berücksichtigt. Des Weiteren ist ein sukzessiver Ausbau der Ladeinfrastruktur nicht Teil des klassischen MCLP. Sie muss als ein separates oder vielmehr ergänzendes Problem betrachtet und gelöst werden.

Das Problem ist NP-schwer (Church, Storms & Davis (1996)). Somit sind klassische Ansätze, wie dynamische Programmierung oder Branch and Bound, für das Problem eher ungeeignet, da der Rechenaufwand mit der Größe des Problems exponentiell anwächst. In unserem Fall enthält die letzte Ausbaustufe 935 Ladestationen mit zwei Ladepunkten pro Station und es müssen 5062 POI abgedeckt werden. Diese Zahlen wurden, wie in Kapitel 3.2.3 aufgeführt, aus den Projektionszahlen der Bundesregierung abgeleitet. Die Größe des Problems verhindert somit die Möglichkeit, eine exakte Lösung zu berechnen und erzwingt eine approximative Strategie.

Flow Capturing Location Model

Ein, im Gegensatz zum MCLP, dynamischer Lösungsansatz ist die Betrachtung als Flow Capturing Location Model (FCLM) (Hodgson (1990); Kuby & Lim (2005)). Das Ziel ist die Platzierung der Ladestationen an vielbefahrenen Strecken, so dass Fahrzeuge aus dem Verkehrsfluss mit geringen Kosten eine Ladestation aufsuchen können, um anschließend mit minimaler Unterbrechungszeit die Fahrt fortzusetzen. In der Literatur wird die Modellierung als FCLM vor allem für Ladeinfrastrukturprojekte an Schnellstraßen oder für große Gebiete beschrieben. Kapazitätsgrenzen und Warteschlangen an den Ladestationen werden im FCLM ebenfalls nicht berücksichtigt. Das

FCLM eignet sich vor allem, wenn die Ladevorgänge während einer Fahrtunterbrechung erfolgen, ähnlich dem Tankvorgang bei Verbrennungsmotoren. Ein sukzessiver Ausbau der Ladeinfrastruktur ist nicht Teil des FCLM, sondern muss als separates oder ergänzendes Problem betrachtet und gelöst werden.

Die MCLP-Formalisierung erlaubt es uns, mit Hilfe von Nachfragepunkten, die zudem gewichtet werden können, ein idealisiertes Raster der Ladestationen anzustreben. Da allerdings für dieses Projekt keine Verkehrsflussdaten verfügbar sind, kann kein Ansatz, der auf FCLM beruht, angewendet werden.

Die Zielvorgaben und die Datenlage im Projekt verhindert die Behandlung des Problems als FCLM, da hierzu eine vollständige Erfassung der gerichteten Verkehrsströme als Grundlage benötigt wird. Für eventuelle Nachfolgeprojekte wäre es jedoch im Sinne des Auftraggebers, eine solche realitätsnähere Lösung in Betracht zu ziehen, da die Optimierungsstrategie unter FCLM, im Gegensatz zu MCLP, die eigentlichen Verkehrsströme als wichtiges Kriterium mit einbeziehen kann. Somit könnte auch das untergeordnete Ziel der Verkehrsflussoptimierung in der Stadt Bonn und seinem Umland mit einbezogen werden.

2.2.2 Strategien

Es gibt verschiedene Ansätze dafür, ein idealisiertes Raster unter Berücksichtigung des sukzessiven Aspekts zu entwickeln. Die Auswahl der Ansätze ist abhängig von der Art der Auswahlkriterien und von den Qualitätsanforderungen.

Da der Problemraum sehr groß und nicht mit exakten Algorithmen in übersehbarer Zeit berechenbar ist, wird statt einer exakten somit eine approximierte Lösung angestrebt. Der algorithmische Ansatz basiert auf den so genannten genetischen Algorithmen (GA), welche eine Lösung mit Hilfe von auf biologischen Prozessen wie Evolution und Genetik basierenden Methoden approximieren. Ein ähnlicher Ansatz hat sich für MCLP behauptet (Zarandi, Davari & Sisakht (2011); Berman, Drezner, Krass (2010); Farahani, Asgari, Heidari, Hosseininia & Goh (2012); Reininger, Iksal, Caminada & Korczak (1999)), allerdings wurden diese Ansätze auf ein diskretisiertes Problem angewendet. Die möglichen Positionen der Versorgungsstationen wurden vorher festgelegt, was im vorliegenden Fall nicht möglich oder sogar unerwünscht ist.

Der sukzessive Aspekt dieses Projekts wird berücksichtigt, indem das MCLP mit einer (festen) Anzahl von Stufen erweitert wird, die in zunehmender Reihenfolge gelegt sind. Ähnliche Ansätze wurden in früheren Arbeiten erprobt (Reininger, Iksal, Caminada & Korczak (1999); Canel, Khumawala, Law & Loh (2001); Albareda-Sambola, Fernández, Hinojosa & Puerto (2009)).

Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen (Holland (1975)) brauchen eine passende formale Lösungsbeschreibung, die als Genotyp-Phenotyp-Pärchen verstanden wird. Der Genotyp enthält eine abstrakte Kodierung des Problems, welches auf einzelnen Genen abgebildet

wird. Dies erlaubt es, mit Hilfe von Rekombinations- und Mutationsoperatoren Lösungen abzuändern und miteinander zu verschmelzen. Der Phenotyp wird aus dem Genotyp abgebildet und entspricht der eigentlichen Lösung, in diesem Fall einer Verteilung von Ladestationen mit ihren jeweiligen Geo-Koordinaten.

Der Evolutionsprozess wird angestoßen, indem eine feste Zahl von willkürlichen Lösungen, sogenannten Individuen, erzeugt wird. Die Güte der Lösungen wird bestimmt und dient als Basis für die Erzeugung einer neuen Generation an Lösungen aus der aktuellen Population. Alte Lösungen werden miteinander rekombiniert und mutiert. So entsteht eine neue Population, die etwas besser ist als die vorherige. Die hier beschriebene Iteration wird wiederholt, bis sich die beste Lösung einer Population nicht mehr ändert und somit der Algorithmus konvergiert.

Sukzessiver Ausbau

Der sukzessive Ausbau bezeichnet die stufenweise Erweiterung der Ladeinfrastruktur über mehrere Jahre bis zu einer finalen Ausbaustufe. Die Priorisierung sorgt dafür, dass in der Planung zuerst die wichtigsten Ladestationen, also jene, für die der größte Bedarf besteht, gesetzt werden. Zur Planung eines sukzessiven Ausbaus existieren zwei Lösungsansätze. Der erste Ansatz - im Folgenden als inkrementell bezeichnet - sieht vor, die Planung analog des Ausbaus vorzunehmen, das heißt, es wird mit der kleinsten Stufe gestartet und das Ergebnis jeweils als Teil der Lösung für die nächste Stufe verwendet. In diesem Fall wird die kleinste Stufe optimiert, so dass die wichtigsten Platzierungen zuerst erfolgen.

Inkrementelle Strategie

Im eingesetzten GA, mit dem der inkrementelle Ansatz realisiert wird, optimieren wir jede Phase sequentiell, wobei das Ergebnis der vorherigen Stufe als Ausgangspunkt für die Optimierung der nächsten dient. Dieser Ansatz kann vom Herunterbrechen des Problems in kleinere Teilprobleme profitieren. Es besteht aber die Gefahr, weil jede Stufe die Initiallösung der nächsten Stufe festlegt, dass der Algorithmus in einem lokalen Minimum landet und nicht zu einer global-optimalen Lösung konvergiert. Mögliche Lösungen werden in diesem Ansatz als Liste von Realwertpärchen, die Längen- und Breitengrad nach dem Gauß-Krüger-Koordinatensystem darstellen, abgebildet. Jede Ladestation hat in dieser Liste einen festen Eintrag. Der Rekombinationsoperator ist so definiert, dass zufällig aus den Partnerindividuen Ladestationen ausgewählt und zu einem neuen Individuum kombiniert werden. Der Mutationsoperator zieht eine zufällige Zahl aus einer Gauß-Verteilung mit $\mu = 3500\text{m}$ und addiert oder subtrahiert diese zum existierenden Koordinatenelement.

Dekrementelle Strategie

Der zweite Ansatz, der als dekrementell bezeichnet wird, besteht aus einem direkten Optimierungsschritt der letzten Stufe, wonach die Ladestationen stufenweise entfernt werden. Somit werden die wichtigsten Ladestationen der nächstgrößeren Stufe behalten und für die kleinere Stufe verwendet. In diesem Fall kann die finale Ausbaustufe direkt optimiert werden, in den Zwischenstufen sind unter Umständen allerdings nur suboptimale Teillösungen verfügbar.

Dieser Ansatz vermeidet die mögliche Problematik der lokalen Minima, hat aber das Problem, dass die letzte Stufe in einem Schritt berechnet wird, was zu erhöhtem Rechenaufwand führt. Zudem ist nicht sichergestellt, dass die Stufen an sich optimal verteilt sind, da nur die Platzierungen der letzten Phase berücksichtigt werden. Der eigentliche Ansatz wird mit der Lösung der letzten Stufe initialisiert. Die Kodierung des Genotyps besteht aus booleschen Werten, die es ermöglichen, Ladestationen zu entfernen. Der Rekombinationsoperator wurde als Konjunktion zweier boolescher Werte implementiert. Mutiert wird, indem eine willkürliche Ladestation aus- und dafür eine zweite, willkürliche Ladestation eingeschaltet wird.

Unabhängige Strategie

Der letzte Ansatz betrifft die direkte und stufenweise unabhängige Berechnung der Verteilung. Da dieser Ansatz keine vorhandenen Platzierungen mit einbezieht, ist diese nicht für die stufenweise Verteilung geeignet. Sie eignet sich aber für eine Einschätzung einer bestmöglichen Verteilung und kann in einer Vergleichsstudie verwendet werden.

Strategieauswahl

Zur Auswahl einer passenden Strategie wird im nachfolgenden Kapitel eine von uns durchgeführte Vergleichsstudie beschrieben.

3 Entwicklung einer Strategie für die Region Bonn- Rhein-Sieg

3.1 Verfahrensauswahl

Im vorherigen Kapitel wurden Erfahrungen aus anderen Regionen, sowie der Stand der Forschung, Methoden und Algorithmen beschrieben. Im nun folgenden Kapitel wird eine spezifische Strategie für Bonn und den Rhein-Sieg-Kreis entwickelt, wobei Verfahren aus sowohl verkehrstechnischer, geografischer als auch informationstechnologischer Sicht zusammengeführt werden.

3.1.1 Zweistufige Vorgehensweise

Ziel des Projekts ist die genaue Bestimmung möglicher Positionen für Ladestationen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, bedarf die genaue Positionierung eines nachgelagerten Prozesses, da viele Ausschlusskriterien nicht automatisiert verarbeitet werden können. Die Datenlage und Komplexität der Problemformalisierung führen somit zu einer Zweistufigkeit, wobei in einem ersten Schritt ein idealisiertes Raster mit Hilfe der Algorithmik entwickelt wird und in einem nachgelagerten Schritt die Detailplanung erfolgt.

Das idealisierte Raster erfolgt, ebenfalls aufgrund der Komplexität der Detailplanung, ohne Vorgabe möglicher Standorte für Ladestationen, sondern erlaubt die freie räumliche Platzierung von Ladestationen. So wird der initiale Aufwand zur Bestimmung

möglicher Standorte vermieden, der außerdem auch die Lösungsfreiheit des Algorithmus einschränken würde. Durch die freien Platzierungen kann der Algorithmus die Lösung unabhängiger optimieren.

3.1.2 Optimierungsverfahren

Zur Bestimmung des am besten geeigneten Lösungsansatzes wurde eine Vergleichsstudie (Spieker, Hagg, Asteroth, Meilinger, Jacobs & Oslislo (2015)) für einen Ausschnitt des Ausgangsproblems durchgeführt (siehe Abbildung 2). Der Ausschnitt enthält typische Regionen: sowohl dünn besiedelte, ländliche als auch städtische Gebiete und enthält 1230 POI². Da nicht von vornherein klar ist, ob ein inkrementeller oder ein dekrementeller Ansatz zu den besten Zwischen- und Endergebnisse führt, wurden diese direkt miteinander verglichen.

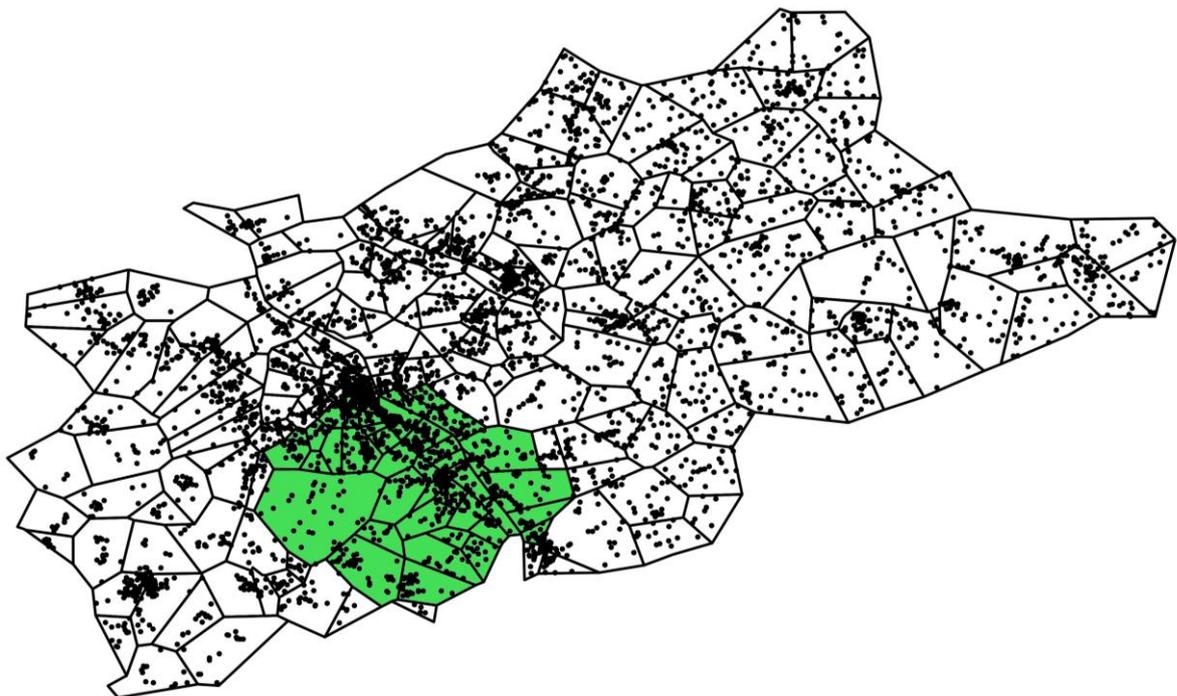


Abb. 2: Für die Vergleichsstudie verwendeter Ausschnitt des Zielgebiets (grün)

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der beiden Ansätze. Hierzu wurden für die Stufen mit 50 bzw. 100 Ladestationen mit Hilfe der unabhängigen Strategie optimale Verteilungen berechnet. Anschließend wurde die inkrementelle Strategie eingesetzt, um eine Verteilung für die Zielstufe mit 75 Stationen zu berechnen. Die dekrementelle Strategie wurde ebenso eingesetzt um von der letzten Stufe eine Verteilung für die Zielstufe zu erzeugen. Somit konnten die Strategien direkt miteinander verglichen werden. Es wurde deutlich, dass der inkrementelle Ansatz zu einer wesentlich besseren Verteilung in der Zielstufe mit 75 Ladestationen führt. Die Zerlegung des Problems in kleinere Teilprobleme hat den Vorteil, dass eine Lösung in weniger Schritten gefunden wird, und bietet, wegen des monotonen Problemcharakters, einen zulässigen Lösungsweg,

² Die POI enthielten insgesamt eine Gewichtung von 1678.

da der Algorithmus zuerst die Positionen belegt, die die größte Abdeckungssteigerung erzielen.

Da der inkrementelle Ansatz im Vergleich mit dem dekrementellen Ansatz eindeutig zu besseren Ergebnissen führt und dieser Ansatz eine zwischenzeitliche Neuplanung stark vereinfacht, wird im weiteren Verlauf des Projekts mit dem inkrementellen genetischen Algorithmus gearbeitet.

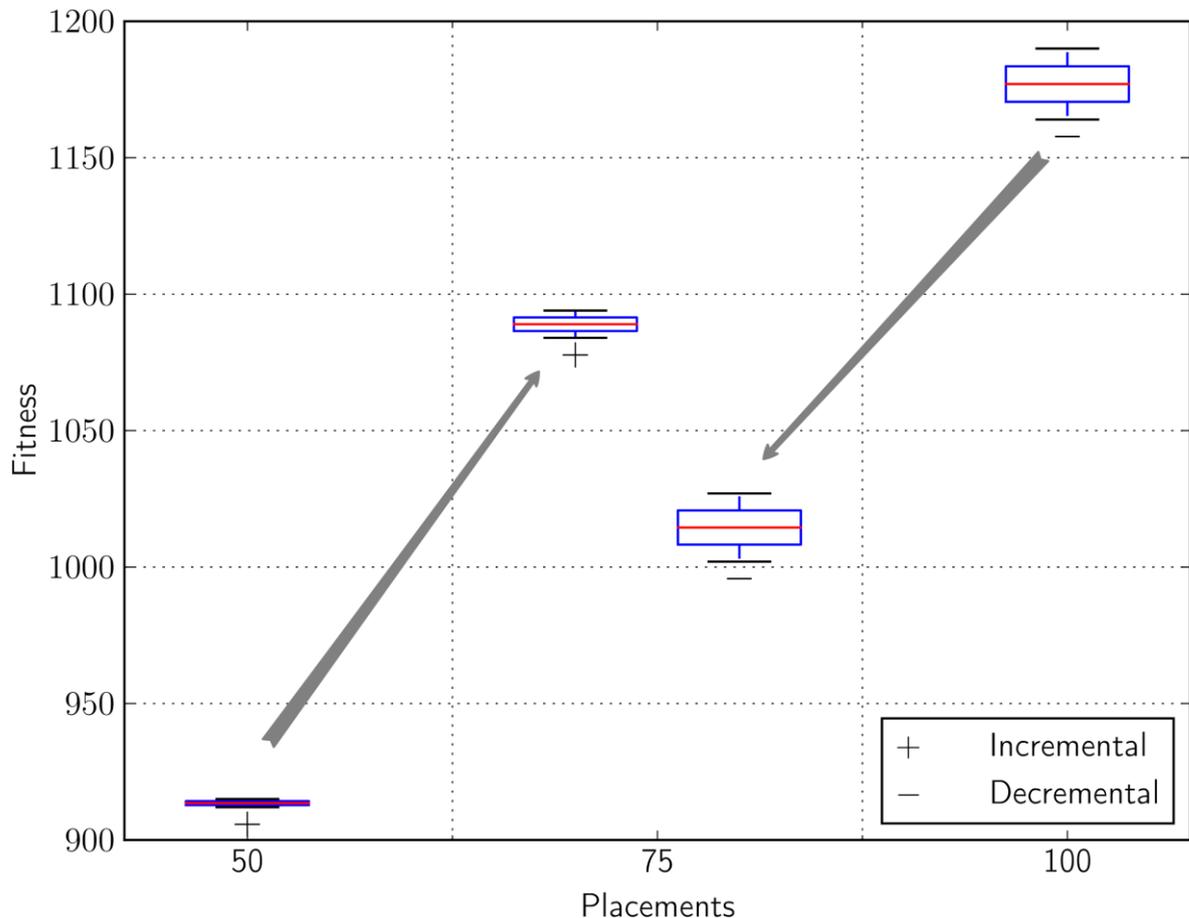


Abb. 3: Gütevergleich in einer Stufe (75 Placements) zwischen inkrementellem (*incremental*) und dekrementellem (*decremental*) Ansatz. Der inkrementelle Ansatz schneidet deutlich besser ab, d.h. er erzielt einen höheren Fitnesswert (Spieker, et al. (2015))

3.2 Datengrundlage der vorliegenden Studie

3.2.1 Berücksichtigte Standortoptionen

In einem ersten Schritt wurde für die Standortoptimierung nach einer maximalen Abdeckung von Nachfragepunkten, POIs, gesucht, da diese Standorte sind, welche von PKW- und Fahrrad-Nutzern häufig aufgesucht werden. Die entsprechenden Standorte basieren auf den POI-Datenbanken der Stadt Bonn und des Rhein-Sieg-Kreises (Sehenswürdigkeiten und Wander-/Freizeitpunkte), die um die ÖPNV-Haltestellen ergänzt sind. Insgesamt wurden 8.729 potentielle Standorte berücksichtigt. Auch wurden die

vorhandenen E-Auto-Ladesäulen und E-Bike-Stationen als fester und initialer Bestandteil der Verteilung berücksichtigt. Darüber hinaus wurden für E-Bikes Radabstellanlagen berücksichtigt. Für die Platzierung der E-Bike-Stationen wurden zusätzliche Punkte entlang der touristischen Radwege generiert, um den Bedarf an Ladestationen entlang der Strecke zu modellieren. Aufgrund des dichten Straßennetzes wird dieser Schritt für die Verteilung von E-Auto-Ladesäulen nicht durchgeführt.



Abb. 4: Verkehrszellen und POIs in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis.

Da es Unterschiede bei den POIs bezüglich ihrer Eignung als Ladeinfrastruktur-Standort für Elektromobilität gibt, wurde eine Gewichtung eingeführt. Diese ermöglicht eine Differenzierung der POIs bezüglich ihrer Relevanz als Ladepunkt. Ein wichtiges Kriterium bei der Gewichtung ist dabei die geschätzte Parkdauer an diesen POIs, denn an Standorten, an denen besonders lange geparkt wird, kann auch besonders lange geladen werden. ÖPNV-Verknüpfungspunkte wurden zudem höher gewichtet, um die intermodale Mobilität zu fördern. Informationen über die Anzahl der Linien, welche an einem Haltepunkt oder Bahnhof halten, wurden ebenfalls zurate gezogen. Dabei ergaben sich für E-Autos und E-Bikes nur geringfügige Unterschiede:

Standorttyp	relevant für E-Autos	relevant für E-Bikes
Points of Interest	nur diejenige, die für Autoverkehr relevant sind; Gewichtung, s.u.	nur diejenigen, die für Radverkehr relevant sind; Gewichtung, s.u.
Parkplatzanlagen	Parkplatzanlagen für Autos, gewichtet nach Auslastung der vorhandenen Parkplätze und durchschnittlicher Parkdauer	Radabstellanlagen, gewichtet nach Auslastung und durchschnittlicher Parkdauer
ÖPNV-Standorte	gewichtet nach Anzahl der Linien und Anzahl der täglichen Ein- und Aussteiger	

Aufgrund der Verschiedenartigkeit der Bedarfspunkte wurde in Abstimmung mit Vertretern von Stadt und Kreis ein Gewichtungsschema entwickelt, das die Relevanz der verschiedenen Punkte hervorheben und klassifizieren soll.

Hierzu wurden drei Klassen gebildet, wobei die Gewichtung 1 die niedrigste Priorität und die Gewichtung 3 die höchste Priorität darstellt. Die Klassen wurden wie nachfolgend eingeteilt:

Klasse 1	Studentenwohnheime, Schulen, Altenheime, Institute, Behörden mittlerer Größe, Ämter, Ministerien, Stadtbüchereien, große Museen, größere Theater, Opern, Schwimmbäder, Sportplätze, Tennisplätze, Reitanlagen, Golfplätze, Vergnügungsparks, Turnhallen, Gemeindeverwaltungen, Volkshochschulen, Amtsgerichte, Musikschulen, wichtige Sehenswürdigkeiten, Autobahnauffahrten (AS)
Klasse 2	Parkplätze mittlerer Größe, Parkplätze, Krankenhäuser, Kliniken, Berufskollegs, größere Stadtverwaltungen, Fachhochschulen
Klasse 3	Hbf, Park&Ride, Bike&Ride, größere Bahnhöfe, ÖPNV-Punkte mittlerer Größe, große ÖPNV-Punkte, große Parkplätze, Parkhäuser, Tiefgaragen, große Flughäfen

Bei der praktischen Umsetzung der Gewichtung von POI bleibt zu berücksichtigen, dass sich z.B. der Flughafen Köln-Bonn in einer Klasse mit Parkhäusern und Tiefgaragen befindet, jedoch das tatsächliche Verkehrsaufkommen deutlich verschieden ist. Dies gilt auch für die Universität Bonn, die für jeden Einzelstandort in der Klasse 3 repräsentiert wird. Gewisse Verzerrungen sind aufgrund der Klassenanzahl nicht zu vermeiden. Bei der Bildung der Klassen waren sich alle Vertreter darüber einig, dass vor allem solche Punkte als Ladepunkte im öffentlichen Raum berücksichtigt werden, die einen primär nicht-kommerziellen Charakter aufweisen. Standorte kommerzieller Betreiber, bspw. Hotels, Bars etc., können eigene Ladepunkte schaffen. Saisonal geprägte Einrichtungen (Campingplätze, Biergärten, Freibäder etc.) finden keine Berücksichtigung.

3.2.2 Berücksichtigung von Verkehrsdaten

ÖPNV-Daten

Um die ÖPNV-Verknüpfungspunkte gemäß ihrer Bedeutung gewichten zu können, wurden ÖPNV-Verkehrsdaten berücksichtigt. In der nachfolgenden Abbildung ist die Konzentration des ÖPNV (Verknüpfungspunkte 1. Ordnung) in und um Bonn deutlich zu erkennen.

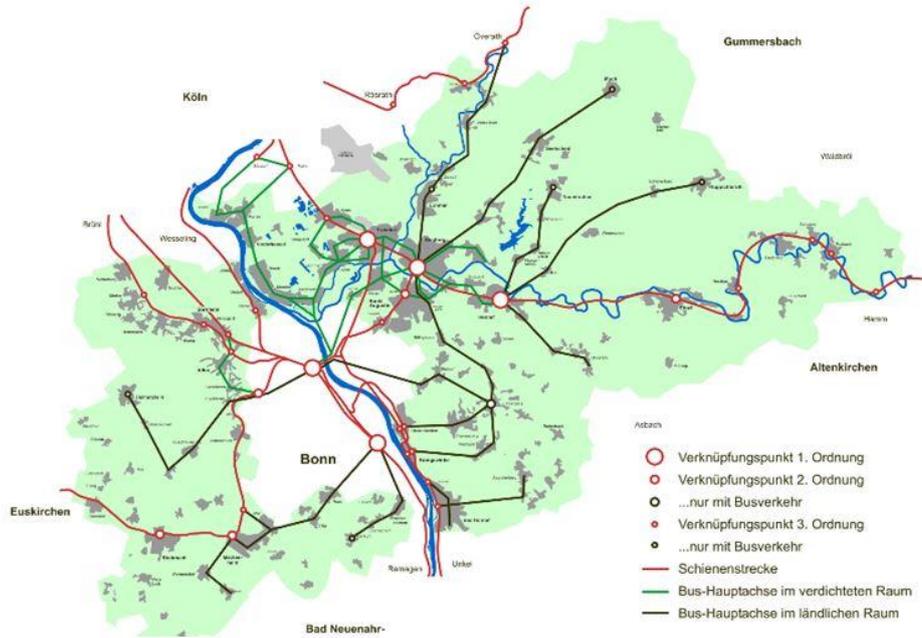


Abb. 5: Nahverkehrsplan 2012 Plus des Rhein-Sieg-Kreis (Rhein-Sieg-Kreis (2013), S. 52)

Die peripheren Kreisgebiete werden lediglich durch wenige Schienenwege und Bushauptachsen an den Verdichtungsraum in überwiegender Ost-West-Richtung angeschlossen. Dies entspricht einem Teil des Stroms von Berufspendlern in den Bonner Raum, wie dies aus der nachfolgenden Abbildung hervorgeht.

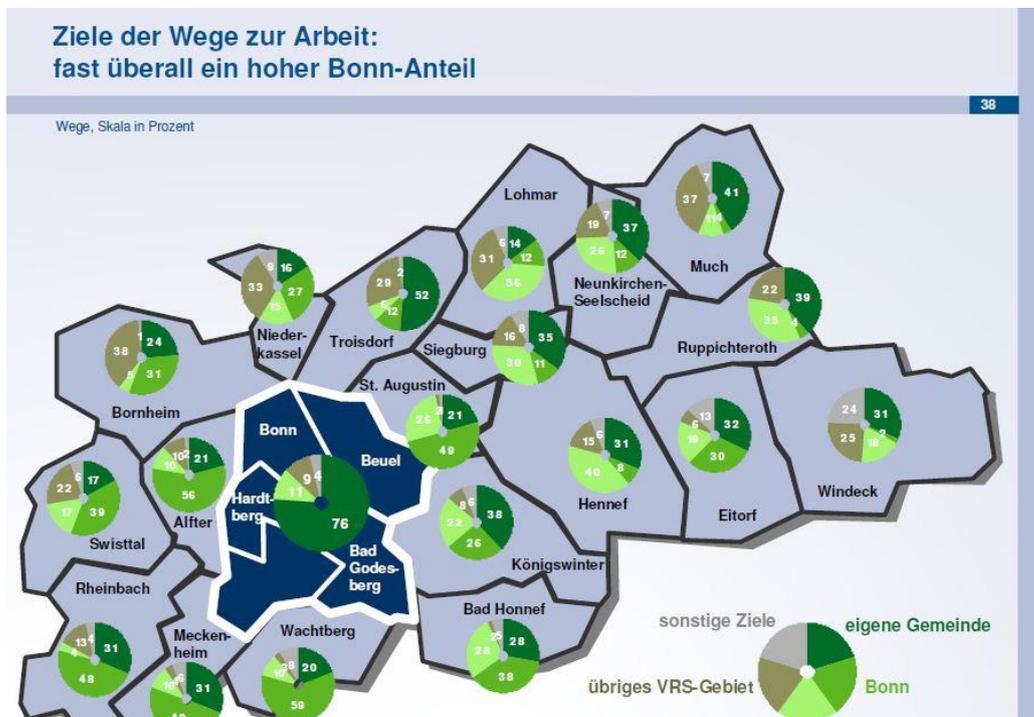


Abb. 6: Alltagsverkehr in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis (infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2009), S. 38)

Abbildung 6 ist zu entnehmen, dass bei den Wegen zur Arbeit ein nicht unerheblicher Anteil der Befragten, aus den am weitesten entfernten Kommunen im Rhein-Sieg-Kreis, als Ziel Bonn bzw. andere Kommunen im Rhein-Sieg-Kreis angibt. Letztere schließen Pendler in die Kreis-Kommunen im Bonner Verdichtungsraum ein. Neben dem ÖPNV wird durch Pendler auch der MIV in erheblichem Umfang genutzt, wobei die Hauptverkehrsadern (BAB 4/3 und B 56, B 478) ähnlich dem ÖPNV angeordnet sind. Damit sind die wichtigsten ÖPNV-Umstiegspunkte auch gleichzeitig potentielle Standorte für Pendler, die auf elektromobilen MIV umsteigen und diese Umstiegs-
punkte als Ladepunkte aufsuchen. Entsprechend wurden die ÖPNV-Umstiegspunkte gemäß Ein-, Aus- und Umstiegszahlen gewichtet.

Verkehrszellen

Die Basisdaten in Form von POIs führen zu einem statischen Modell, welches nur das Vorhandensein von Punkten berücksichtigt, jedoch keine Verkehrsflüsse. Das Ergebnis des sukzessiven Optimierungsalgorithmus, d.h. die Vorschläge für eine optimale Ladesäulenverteilung, ist aber abhängig von der Beschreibung des "Nachfragevolumens". Aus diesem Grund wird als zusätzliches Kriterium das Verkehrsaufkommen zwischen den Verkehrszellen, d.h. ein- und ausgehender Verkehr, in die Gewichtung der Bedarfspunkte aufgenommen.



Abb. 7: Übersicht der 234 Verkehrszellen, die das Stadt- und Kreisgebiet aufteilen.

Generell kann das Nachfragevolumen an Hand einer Reihe von Verkehrsdaten quantifiziert werden. Hierzu gehören Verkehrsaufkommen zwischen Verkehrszellen, d.h. Quell- und Zielverkehr in den jeweiligen Verkehrszellen, aber auch Gebietstypisierungen zur Identifikation von Gebieten mit hoher Nachfrage und langen Standzeiten, wie Gewerbegebiete, Standorte großer Arbeitgeber, Stadt- und Gemeindezentren, Wohnungsschwerpunkte von Laternenparkern, PKW-Bestand pro Verkehrszelle. Solche Verkehrsdaten können auch im MCLP als Kriterium berücksichtigt werden. Hierzu wurde die Zielregion in einem frühen Stadium des Projekts in Absprache mit den Partnern in Verkehrszellen (siehe Abbildung 7), die üblicherweise in der Verkehrsplanung verwendet werden, eingeteilt. Jeder dieser Verkehrszellen enthält eine Anzahl an POIs.

Die räumliche Einteilung des Stadt- und Kreisgebietes erfolgt anhand festgelegter Verkehrszellen aus der Verkehrsplanung, insgesamt 234 Stück.

Zur Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens werden Verkehrsdaten, die im Verkehrsmodell des Rhein-Sieg-Kreises enthalten sind, verwendet. Es handelt sich um den Quell- und Zielverkehr in den jeweiligen Verkehrszellen.

Auch wenn herkömmliche E-Bikes und Pedelecs häufig Radwege nutzen (sofern vorhanden), so kann doch davon ausgegangen werden, dass sich der Radverkehr durch die elektrische Unterstützung in Gebiete ausdehnt, in denen er bisher nur eine untergeordnete Rolle gespielt hat, wie z.B. hügeliges Gelände und über größere Distanzen hinweg. Daher wurde der Radverkehr in der Studie nicht nur auf das Radwegenetz beschränkt, sondern auch Straßen (ohne Autobahnen und Autostraßen) berücksichtigt. Aus demselben Grund wurde für die E-Bike-Simulationen nicht das aktuelle Radverkehrsaufkommen zugrunde gelegt, sondern der Mobilitätsbedarf am Autoverkehrsaufkommen festgemacht.

3.2.3 Festlegung der Ausbauziele

Um zu ermitteln, welche Ausbauziele für die Ladeinfrastruktur angestrebt werden sollten, wurden die Ziele der Bundesregierung verwendet und der PKW-Bestand in Deutschland dem PKW-Bestand in der Region Bonn-Rhein-Sieg gegenübergestellt.

Phase		Markthochlauf	Beginnender Massenmarkt
Jahr	2014	2017	2020
öffentl. Ladepunkte in Deutschland ³	7.000 ⁴	60.000	150.000
PKW-Bestand in Deutschland ⁵	43,9 Mio. ⁶	ca. 44,9 Mio.	ca. 46,2 Mio.
PKW pro öffentl. Ladepunkt ⁷	6.271	748	308
PKW-Bestand in Bonn + Rhein-Sieg-Kreis ⁸	ca. 511.227	ca. 542.618	ca. 576.002
öffentl. Ladepunkte in Bonn + Rhein-Sieg-Kreis ⁹	84 ¹⁰	ca. 725	ca. 1.870

Tabelle 1: Eigene Abbildung in starker Anlehnung an Hoffmann (2013)

Die Projektteilnehmer haben sich darauf geeinigt, geplante Ladesäulen für E-Autos auf den Steckertyp "Typ 2/CCS Stecker" auszulegen. Ein bestimmter Ladesäulentyp wurde nicht festgelegt. Jede Ladesäule beinhaltet zwei Ladepunkte.

Damit ergeben sich folgende Zielzahlen für einen sukzessiven Ausbau der Ladeinfrastruktur bis 2020:

³ Prognose nach NPE-Szenario (Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), AG 3 – Ladeinfrastruktur und Netzintegration (2012): Ladeinfrastruktur bedarfsgerecht aufbauen. Arbeitspapier. Nationale Plattform Elektromobilität, Berlin.)

⁴ LEMnet: 7.000 Ladestationen im Oktober 2014, ca. 2 Ladepunkte pro Ladestation, <http://lemnet.org/de/>, [Zugriff am 16.01.2015].

⁵ Eigene Fortschreibung über den gemittelten prozentualen Zuwachs des PKW-Bestandes in Deutschland nach Kraftfahrt-Bundesamt (2010, 2011, 2012, 2013, 2014).

⁶ Kraftfahrt-Bundesamt: Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2014, http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html, [Zugriff am 16.01.2015].

⁷ Anzahl der PKW in Deutschland ÷ Anzahl der Ladepunkte in Deutschland

⁸ Eigene Fortschreibung über den gemittelten prozentualen Zuwachs des PKW-Bestandes in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis nach Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (MBWSV NRW)(2009,2010,2011,2013): Mobilität in Nordrhein-Westfalen – Daten und Fakten, Düsseldorf.

⁹ Anzahl der PKW in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis ÷ Anzahl der PKW pro öffentlichem Ladepunkt

¹⁰ LEMnet: 42 Ladesäulen in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis, ca. 2 Ladepunkte pro Ladestation, <http://lemnet.org/de/>, [Zugriff am 16.01.2015].

Jahr	Anzahl der zu errichtenden Ladesäulen
2016	256
2017	363
2018	553
2019	743
2020	935

Tabelle 2: Errechnete Zielvorgabe Anzahl Ladestationen

Allgemein sollte Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge dort gebaut werden, wo diese besonders lange laden können und wo gleichzeitig ein hohes Verkehrsaufkommen und somit ein großer Bedarf ist. Besonders sinnvoll ist es, in Parkhäusern und Tiefgaragen Ladesäulen für E-Autos zu errichten, da dort ein besonderer Schutz vor Vandalismus und Witterungseinflüssen besteht und die Errichtung und Wartung der Ladeinfrastruktur somit günstiger ist. Häufig können dort auch Wallboxen anstatt Säulen errichtet werden, welche nochmals preiswerter sind. Auch ÖPNV-Verknüpfungspunkte und Park-&-Ride-Plätze eignen sich allgemein besonders als Ladestandorte, denn dort kann die intermodale Mobilität gefördert werden, was die Umweltbelastung senken und Verkehrsprobleme verhindern kann. So können beispielsweise Berufspendler auf andere Verkehrsträger umsteigen oder Mitfahrgelegenheiten bilden, während ihr Elektrofahrzeug lädt.

Für den Ausbau der E-Bike-Stationen wurden die gleichen Zielzahlen verwendet, wie für E-Autos. Auch wenn man argumentieren kann, dass E-Bikes weniger abhängig von einem flächendeckenden Ausbau an Ladesäulen sind, da auch gefahren werden kann, wenn der Akku leer ist, so ist dies dennoch mit mehr Kraftaufwand verbunden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass eine flächendeckende Ladeinfrastruktur auch bei Elektrofahrrädern ein wichtiges Akzeptanzkriterium ist. Hinzu kommt, dass die Wachstumsrate im E-Bike-Bereich wesentlich über der Rate bei den Elektroautos liegt, wobei der aktuelle Bestand in Deutschland derzeit weit über 1 Mio. liegt, was ebenfalls für einen starken Ausbau der E-Bike-Infrastruktur spricht.

3.2.4 Datenverfügbarkeit

Für die Berechnung der zusätzlichen Ladesäulen wurden vom Rhein-Sieg-Kreis und der Stadt Bonn unterschiedliche Auswertungen zur Verfügung gestellt. Im Rahmen von Haushaltsbefragungen zur Mobilität in Deutschland 2008 wurden übergreifend für den Raum Bonn und den Rhein-Sieg-Kreis empirische Daten erhoben, die in der Analyse "Alltagsverkehr in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis" veröffentlicht wurden. Anhand von ca. 10.000 befragten Personen wurden so u.a. Daten zur Verkehrsmittelwahl, sowie zu Wegehäufigkeiten und Nutzungszwecken, erhoben (infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2009)).

Weiterhin wurden von der Stadt Bonn, als auch dem Rhein-Sieg-Kreis, Daten aus verschiedenen eigenen Erhebungen bereitgestellt, die

- die Verkehrszellenanalyse für die Stadt Bonn und den Kreis
- das Verkehrsmodell Bonn (mit Knoten, Raumzonen, Strecken und POIs)
- das Verkehrsmodell des Rhein-Sieg-Kreises
- das Radverkehrskonzept des Rhein-Sieg-Kreises (Hauptachsen)
- den Verkehrsentwicklungsplan der Stadt Bonn (detailliert bis zum Jahre 2020)

umfassen. Die Daten wurden entweder aus Publikationen entnommen, oder aber durch die Kommunalverwaltungen in Form von Datenbank-, Excel- sowie Shape-Dateien zur Verfügung gestellt. Obwohl die erhobenen Daten überwiegend aus den Jahren 2005 bis 2008 stammten, haben sich alle involvierten Teilnehmer darüber verständigt, dass bis heute keine wesentlich neuen Tendenzen zu erkennen sind. Daher wurden die bereitgestellten Daten als ausreichend aktuell erachtet.

Der konkrete Inhalt der Dateien umfasste einerseits u.a.

- Rohdaten im Datenbank- oder Tabellenformat mit georeferenzierten Angaben
 - zu Knotenpunkten und Streckenverläufen,
 - zu POIs mit Haltestellen,
 - Sehenswürdigkeiten,
 - Infrastruktureinrichtungen (wie Ärzten, Schulen, Hochschulen),
 - zu Parkplätzen,
 - Verwaltungen und ÖPNV-Umstiegsunkten (inklusive Ein-, Um- und Aussteigern),

sowie verschiedene Informationen (z.B. Verkehrsaufkommen) auf der Basis unterschiedlicher Raumeinheiten (Verkehrszellen, Stadtbezirke, kommunale Grenzen).

Die verwendeten Verkehrsdaten basieren im Wesentlichen auf dem Verkehrsmodell des Rhein-Sieg-Kreises, woraus ein großer Datenbestand zur Verfügung gestellt wurde. Detaillierte Angaben konnten für Bonn leider innerhalb des Projektzeitraums nicht mehr ermittelt werden, weshalb für die Bonner Verkehrszellen mit den (gröberen) Verkehrsdaten des Verkehrsmodells des Rhein-Sieg-Kreises gearbeitet werden musste.

Gänzlich unberücksichtigt blieben Daten der Netzbetreiber und Energieversorger zum bestehenden Elektrizitätsnetz, da diese Daten nicht im Rahmen des Projektes zur Verfügung gestellt werden konnten. Dies schließt sowohl den Netzverlauf als auch vorhandene Kapazitäten ein. Da für dieses Projekt darüber hinaus keine Verkehrsflussdaten vorliegen, wurden auch keine technischen Daten zu Batteriekapazitäten und Reichweiten von Elektrofahrzeugen in die Studie mit einbezogen.

Sozio-ökonomische Kriterien wurden ebenfalls nicht berücksichtigt, da diese entweder nicht in vollem Umfang vorhanden waren, oder aber nicht mit Standorten im Erhebungsgebiet georeferenziert werden konnten. Ziel der Nutzung solcher Daten wären z.B. Rückschlüsse von der aktuellen Konsum- und Lebensweise auf den Erwerb bzw.

die Nutzung eines E-Fahrzeugs gewesen, die sich anhand von Kriterien wie Einkommen je Haushalt, Beschäftigung, Wohnverhältnisse, Nutzung erneuerbarer Energien etc. ableiten lassen. Gründe für die Nichtverfügbarkeit der Daten liegen einerseits in der mangelhaften Erhebung, als auch dem Schutz von Persönlichkeitsrechten innerhalb der deutschen Gesetzgebung.

Die für die Berechnungen verbliebenen Daten umfassen somit aus den zuvor genannten Gründen in erster Linie die Standortoptionen und deren Gewichtung, sowie die Bestimmung des Nachfragevolumens lediglich anhand des Verkehrsaufkommens zwischen einzelnen Verkehrszellen (d.h. Quell- und Zielverkehr in den jeweiligen Verkehrszellen).

3.3 Detailanalyse als Methode der Nachprozessierung

Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Methode zur Standortbestimmung für einen sukzessiven Aufbau von Ladestationen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, bedarf die genaue Positionierung eines nachgelagerten Prozesses, da viele Ausschlusskriterien nicht automatisiert verarbeitet werden können. Dessen ungeachtet wäre auch der Ausbau der vorhandenen Ladepunkte denkbar.

Im Hinblick auf geowissenschaftlich orientierte Recherchen wurde nach geeigneten Verfahren für den planerischen nachgelagerten Prozess gesucht, die im Rahmen ähnlicher Projekte in der näheren Vergangenheit entwickelt wurden. Dabei stellte sich heraus, dass für Vergleichszwecke am ehesten das Projekt der Freien Hansestadt Hamburg geeignet ist. Dieses beinhaltet einen detaillierten, qualitativen Kriterienkatalog zur praktischen Planung von E-Ladepunkten.¹¹

Dieses Planungsschema wurde im Rahmen eines Workshops konkretisiert und erweitert. Hierzu wurden jeweils eine Verkehrszelle aus dem Bereich der Stadt Bonn und eine weitere aus dem Rhein-Sieg-Kreis (Königswinter) genauer untersucht. In jeder Verkehrszelle befand sich eine je nach Ausbaustufe errechnete Anzahl von Ladepunkten. Neben dem Projektteam sowie Vertretern der Auftraggeber (Stadt- und Kreisverwaltung und Energieversorgungsunternehmen), kamen zum Workshop je Arbeitsgruppe lokale Stadtplaner hinzu. Im Anschluss an die Gruppenphase wurden die Ergebnisse diskutiert. Aus der Diskussion konnten folgende generelle Erkenntnisse abgeleitet werden, so dass die daraus resultierenden Planungsschritte nicht ausschließlich für die lokalen Gegebenheiten relevant sind:

¹¹ Die Matrix des Masterplans Hamburg zur Implementierung einer Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge findet sich in Kapitel 7.2

1. Identifikation geeigneter Flächen¹²:
 - a. Welche Flächen liegen in unmittelbarer Nähe zu den Standortvorschlägen der Optimierung?
 - b. Welche Flächen sind öffentlich zugänglich?
 - c. Wo finden aktuelle Veränderungen im Parkraum statt?
 - d. Gibt es Anfragen (z.B. von Sponsoren) für ganz konkrete Flächen?
2. Überprüfung der prinzipiellen Eignung anhand von Ausschlusskriterien:
 - a. Ist die Fläche verfügbar?
 - b. Besteht ein Widerspruch zu anderen städtebaulichen Belangen (Verkehrsberuhigung, Rheinufernutzung,...)?
 - c. Existieren rechtliche Hindernisse? Besteht z.B. ein Widerspruch zum aktuellen rechtlichen Status der Fläche (Bauleitplanung) oder zu speziellen Schutznormen (Denkmalschutz, Naturschutz, GrünflächenVO, ...) ¹³
3. Prüfung der Eignung aus Nutzerperspektive:
 - a. Ist die Fläche gut erreichbar? Ist eine optimale Nähe zum zugrundeliegenden „Point of Interest“ oder „ÖPNV-Verknüpfungspunkt“ gegeben?
 - b. Ist die Fläche gut zugänglich?
 - c. Ist die Fläche gut sichtbar?
 - d. Besteht ein geringer Parkdruck durch andere Fahrzeuge?
4. Prüfung der baulichen und technischen Eignung der Fläche:
 - a. Ist die Fläche baulich geeignet (Größe, Zugang, Erweiterbarkeit, Querparken möglich, Hochwassergefahr,...)?
 - b. Ist die Fläche technisch geeignet (Stromversorgung realisierbar, Entfernung zu existierenden Leitungen, ausreichende elektrische Leistung verfügbar, ggf. auch für Erweiterungen,...)
 - c. Ist der Aufwand für baulich-technische Zusatzmaßnahmen (z.B. für Hochwassersicherheit, für erhöhte Leistungsbereitstellung, ...) vertretbar?
5. Spezifikation der Ladestation:¹⁴
 - a. Spezifizierung der Anforderungen nach Nutzergruppen, Parkzeit und Nutzeraufkommen
 - b. Berücksichtigung spezifischer baulich-technischer Zusatzmaßnahmen für den Standort (z.B. Hochwasserschutz, Fernüberwachung, ...)
6. Prüfung der Rentabilität:
 - a. Wie hoch ist der bauliche und elektrotechnische Aufwand zur Errichtung der Ladesäule?

¹² Begünstigende Faktoren können neben Parkhäusern und ÖPNV-Verknüpfungspunkten auch anstehende Planungen, konkrete Anfragen von Investoren, Fahrradverleihstationen, Parkplätze für Querparker, die Möglichkeit der Installation einer Solaranlage sowie Standorte vor Steigungen sein.

¹³ Hervorzuheben ist in Bezug auf Einschränkungen, dass keine Behindertenparkplätze zu Ladestandorten umgewidmet werden sollen, dass im Außenbereich nach § 35 BauGB vermutlich nur Ladesäulen errichtet werden dürfen, wenn sie privilegierte Vorhaben sind, dass in engen Gassen darauf geachtet werden muss, dass weiterhin Rettungsfahrzeuge passieren können und dass Hochwasser und andere Wassereinflüsse berücksichtigt werden sollen.

¹⁴ Siehe hierzu auch den Anhang 7.3.2 „Aspekte für die Wahl einer geeigneten Ladestation“

- b. Gibt es Einnahmeausfälle durch Umwidmung von Parkraum?
- c. Wie hoch ist der Verwaltungsaufwand?
- d. Ist die Lage attraktiv und öffentlichkeitswirksam? Ist mittelfristig eine ausreichende Nachfrage nach elektrischer Energie? Welche Zahlungsbereitschaft der Nutzer wird erwartet?

Je nach Situation kann Schritt (2) auch vor Schritt (1) erfolgen, beispielsweise damit nicht nach Ausschluss eher ungeeigneter Standorte kaum noch mögliche Standorte übrig bleiben, oder um mehr Spielraum zu haben, um begünstigende Faktoren, wie z. B. ÖPNV-Anknüpfungspunkte oder Parkhäuser hervorzuheben. Die ersten beiden Schritte können aber auch zeitgleich erfolgen, indem anhand einer Bewertungsmatrix für jeden Standort auf einer Skala von 1-5 angekreuzt wird, inwiefern verschiedene Kriterien zutreffen.

Durch Beschilderungen, Markierungen, Öffentlichkeitsarbeit und Informationsangebote sollte die vorhandene Ladeinfrastruktur beworben werden, um mehr potenzielle Nutzer zu erreichen. Es wird darüber hinaus empfohlen, den Ausbau durch ein Monitoring und eine Evaluation erster realisierter Standorte zu begleiten.

Das Planungsschema auf der folgenden Seite gibt eine Übersicht über den Ablauf der beiden Planungsschritte, inklusive Detailplanung.

Planungsschema

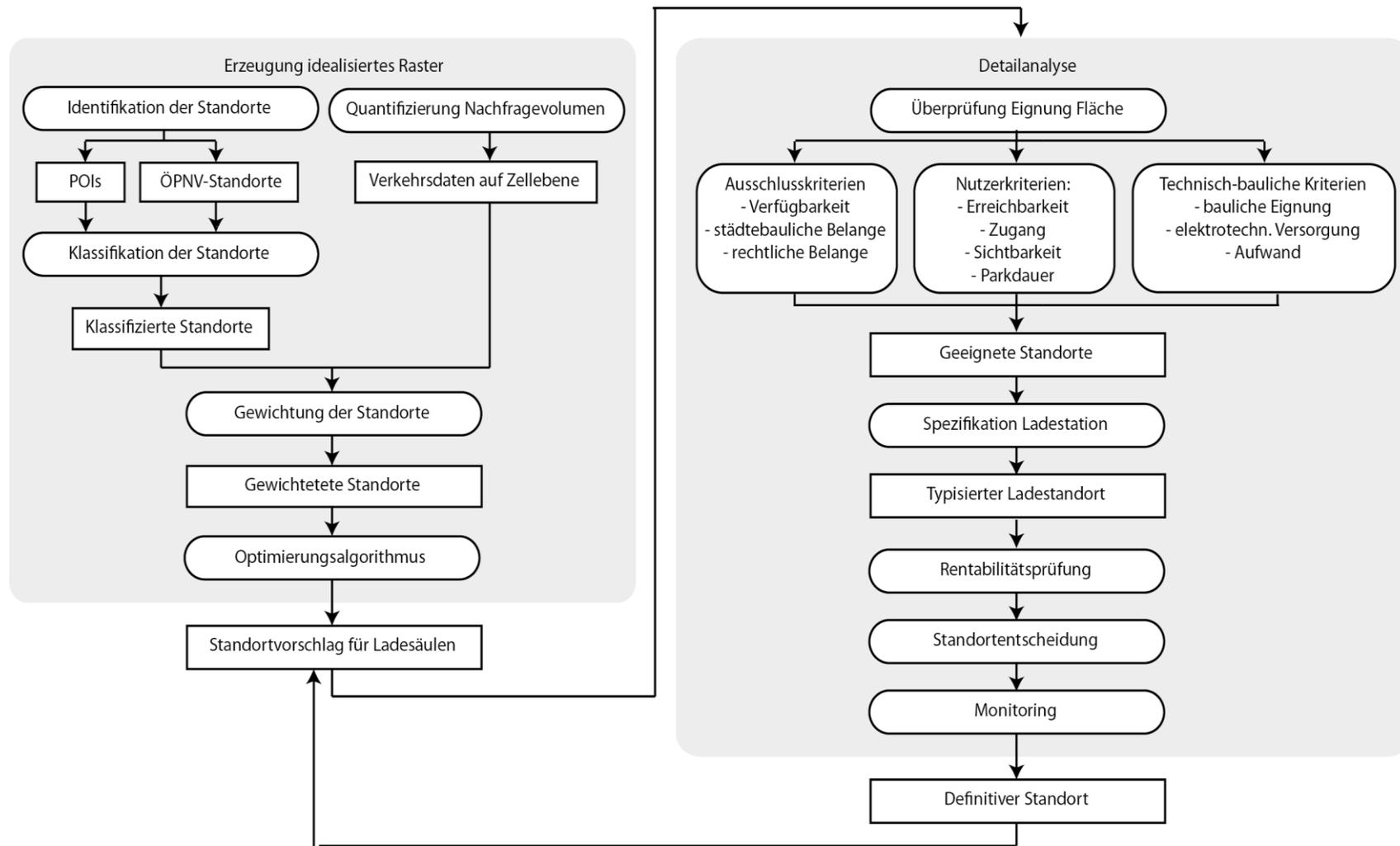


Abb. 8: Schematische Übersicht über den Ablauf der Detailplanung.

4 Ergebnisse der algorithmischen Standortoptimierung

4.1 Elektroautos

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Optimierungsverfahrens für die Planung des Ladestationen-Ausbaus vorgestellt. Dabei werden für Elektroautos (in 4.1.1) und E-Bikes (in 4.1.2) separat die Berechnungsergebnisse sowohl statisch als auch unter Berücksichtigung der Verkehrsdichte gezeigt werden. Die restlichen Ausbaustufen befinden sich im Anhang.

4.1.1 Ohne Verkehr

Die erste Ausbaustufe enthält 256 Ladestationen, die sich im statischen Fall um die Stadtzentren konzentrieren, wie in der Abbildung ersichtlich ist. Es ist zu beobachten, dass aber auch im ländlichen Raum eine gute Verbreitung der Stationen erhalten bleibt. Das Raster wird in der letzten Ausbaustufe mit 935 Stationen wesentlich dichter, obwohl die Verteilung in manchen ländlichen Verkehrszellen doch sehr an den Stadt- und Gemeindezentren hängt.

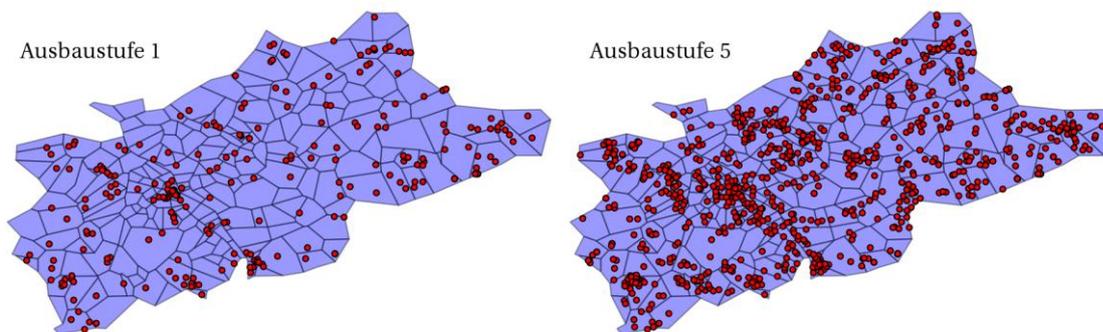


Abb. 9: Direkter Vergleich der ersten und letzten Ausbaustufe. Das idealisierte Raster ist rot markiert.

4.1.2 Mit Verkehr

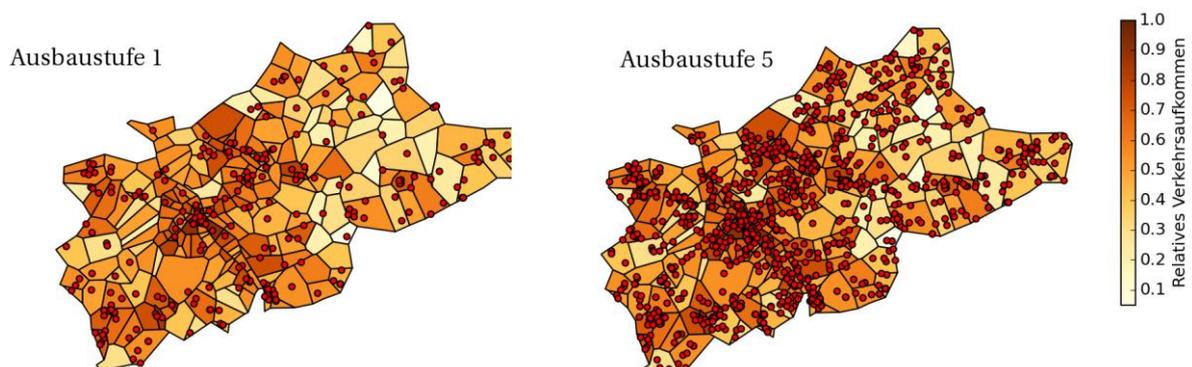


Abb. 10: Direkter Vergleich der ersten und letzten Ausbaustufe. Das idealisierte Raster ist rot markiert. Zudem ist die Verkehrsdichte hinterlegt.

Die Stationen der ersten Stufe befinden sich, unter Berücksichtigung der Verkehrsdichte in einer Zelle, noch näher an den dichtbesiedelten Stadt- und Gemeindezentren. Hervorzuheben ist, dass in dieser Lösung die Zentren Troisdorf, Siegburg und Hennef besser bestückt werden. Die Verteilung in der letzten Ausbaustufe zeigt eine deutliche Konzentration um die Gebiete mit hohem Verkehrsaufkommen.

Durch die Verkehrsdichtegewichtung der Verkehrszellen werden die ländlichen Regionen besser bestückt. Auch werden Gebiete, die mit dem Auto nicht oder kaum befahrbar sind - beispielsweise dem Kottenforst - entsprechend mit weniger Ladestationen bestückt. Dieser Effekt würde sich mit genauen Verkehrsflussdaten noch viel stärker bemerkbar machen.

4.2 Elektrofahrräder

4.2.1 Ohne Verkehr

Die statischen Ergebnisse für den Fahrradverkehr zeigen deutliche Lücken in ländlichen Gebiete auf. In der letzten Ausbaustufe sind diese Lücken, auch im Vergleich zu den Ergebnissen für E-Autos, noch deutlicher zu sehen. Der Kottenforst ist hier wieder beispielhaft zu sehen.

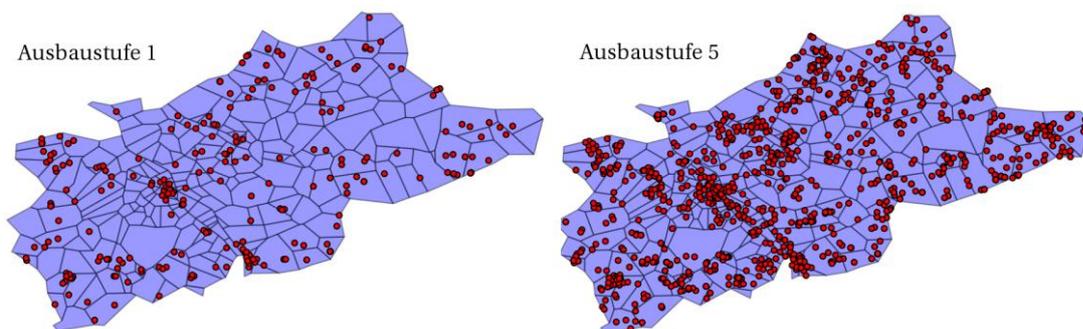


Abb. 11: Direkter Vergleich der ersten und letzten Ausbaustufe. Das idealisierte Raster ist rot markiert.

4.2.2 Mit Verkehr

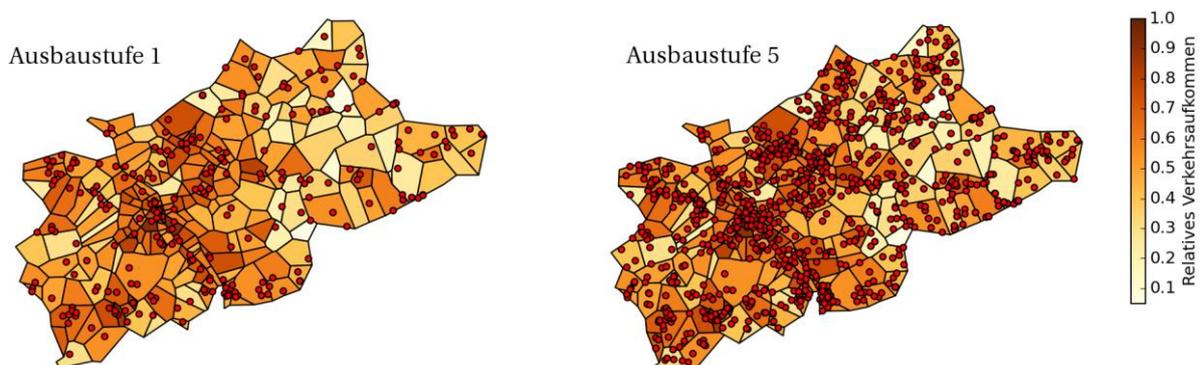


Abb. 12: Direkter Vergleich der ersten und letzten Ausbaustufe. Das idealisierte Raster ist rot markiert. Zudem ist die Verkehrsdichte hinterlegt.

Die Verteilung unter Berücksichtigung der Verkehrsdichte zeigt ein ähnliches Profil wie bei den E-Autos. Allerdings sind hier die Lücken im ländlichen Raum in der ersten Ausbaustufe eher zu groß. In der letzten Ausbaustufe verschwinden diese größtenteils. Berücksichtigt wurden nur die Auto-Verkehrsströme, wie in Kapitel 3.2.2 erläutert. Trotzdem ist festzustellen, dass selbst unter Berücksichtigung von Autoverkehrsdaten eine Verbesserung der Verteilung sichtbar ist. Es ist zu erwarten, dass Daten des eigentlichen Radverkehrs zu einer erheblichen Verbesserung führen würden. Auch müsste man eine Differenzierung zwischen Kurz- und Langstrecken ermöglichen, da bei letzterem eher die Notwendigkeit für Notladungen besteht.

4.3 Diskussion

Die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Verkehrsdichte zeigen, dass unerwünschte Platzierungen, wie z.B. mitten in Naturschutzgebieten, verhindert werden können. Für ein wesentlich genaueres Ergebnis würden allerdings die eigentlichen Verkehrsströme (pro Straße) einen noch deutlicheren Effekt aufzeigen. Dazu benötigt man entweder eine genauere Verkehrsanalyse für Bonn und den Rhein-Sieg-Kreis, bzw. über einen längeren Zeitraum erfasste Verkehrsströme zwischen den Verkehrszellen. Die vorhandenen Verkehrsdaten enthalten lediglich die Dichte des ein- und ausgehenden Verkehrs als zeitliches und räumliches Integral, nicht aber die Verkehrsströme von einer Zelle in die jeweils angrenzenden als Funktion der Tageszeit und der Wochentage. Insbesondere fehlt die Verweildauer des Verkehrs in den jeweiligen Verkehrszellen.

5 Ergebnisse der exemplarischen Detailanalysen

5.1 Beispiel Bonn-Innenstadt

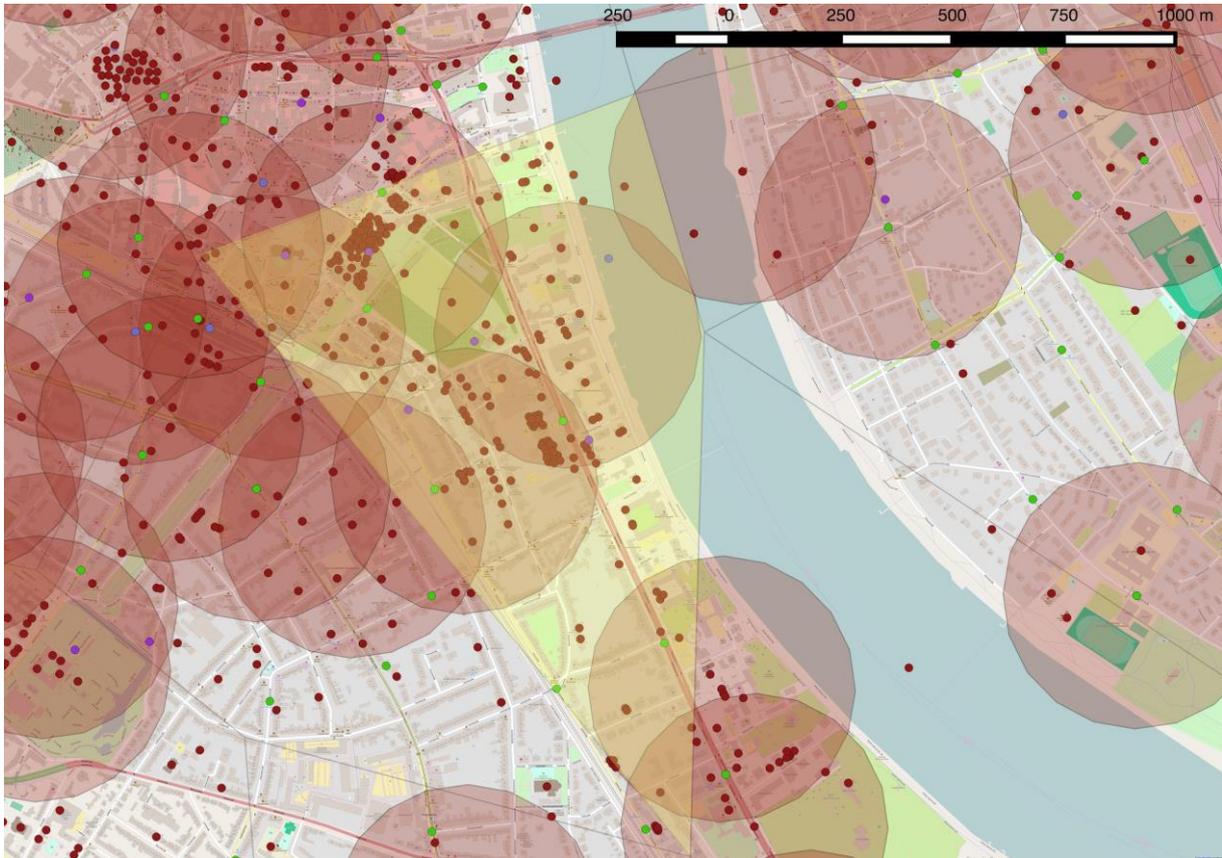


Abb. 13: Verkehrszelle Bonn-Innenstadt *Quelle: Rhein-Sieg-Kreis*. Die Ergebnisse der Optimierung sind als Kreise mit 300m Radius eingezeichnet. Die farbigen Punkte markieren die Points of Interest und die ÖPNV-Verknüpfungspunkte, die der Optimierung zugrunde lagen.

In der ausgewählten Bonner Verkehrszelle, welche sich zwischen Rhein, Marktplatz, Kaiserstraße und südlich spitz zulaufend bis hinter die Schedestraße erstreckt, besteht vor allem bei den innenstadtnahen Standorten ein hoher Ladeinfrastrukturbedarf (siehe Abb. 13). Innerhalb der Gruppe, die sich während des Workshops mit dieser Verkehrszelle befasst hat, wurden folgende planerische Aspekte genannt und diskutiert: Inwiefern ist es möglich, anstehende Planungen, wie z.B. der Umbau der Viktoriakarrees oder die Errichtung von Stationen eines Fahrradverleihsystems dafür zu nutzen, E-Bike-Stationen oder E-Auto-Ladesäulen in einem Zug mit zu planen? Wie ist mit Anfragen von Investoren umzugehen, welche bereit sind, Ladesäulen im öffentlichen Raum zu finanzieren, wenn diese ein Mitspracherecht für die genaue Platzierung der Ladesäule fordern - z.B. damit sie selbst die Ladesäule nutzen können? Es wurde

herausgearbeitet, dass es in zentralen Bereichen, in denen das errechnete Ergebnis einen großen Ladeinfrastrukturbedarf identifiziert, jedoch nur wenige öffentliche Parkplätze zur Verfügung stehen, sinnvoll ist, mit halb-öffentlichen oder privaten Betreibern von Tiefgaragen und Parkhäusern zusammen zu arbeiten. Beispiele hierfür sind die Marktgarage (Bonner City Parkraum GmbH), die Hofgartengarage (Privat) und ein Parkhaus in der Kaiserstraße / Ecke Kaiserplatz (Deutsche Bank).

In vielen Bereichen der Bonner Innenstadt dürfen PKW maximal zwei Stunden lang parken, damit Dauerparken vermieden wird und sich die Parksituation insgesamt verbessert. Da Ladevorgänge von Elektroautos oft deutlich länger sind, wurde vorgeschlagen, dass über Ausnahmen für Elektroautos nachgedacht werden sollte. Darüber hinaus machte sich die Gruppe darüber Gedanken, wie die Reaktion der Verkehrsteilnehmer aussieht, wenn im innenstadtnahen Bereich Parkplätze nur für Elektroautos vorbehalten werden: Die Einschätzungen reichten von der Verärgerung vieler Autofahrer, bis hin zur Annahme, dass dies zu einer Verschiebung des Modal Split weg vom MIV hin zu mehr Radverkehr und ÖPNV führen werde. Die Stadt Kopenhagen ist ein gutes Beispiel dafür, denn dort wurde Parkraum verknappt, was dazu geführt hat, dass deutlich mehr Verkehrsteilnehmer das Fahrrad nutzen (Russfrei fürs Klima 2011). Für den südlichen Bereich der Verkehrszelle sollte beachtet werden, dass hier viele Laternenparker wohnen, welche auf Ladesäulen im öffentlichen Raum angewiesen sind, wenn sie Elektroauto fahren wollen.

Speziell für die Errichtung von E-Bike-Stationen scheinen Standorte, an denen sich große und stark frequentierte Radabstellanlagen befinden, sinnvoll zu sein, wie z.B. am Kaiserplatz, am Bischofsplatz und am Universitätshauptgebäude. An den Radabstellanlagen, an denen häufig alle Stellplätze belegt sind, sollte überprüft werden, ob die Anlagen erweitert werden können und ob sich dort viele Räder befinden, die über lange Zeit nicht benutzt werden.

5.2 Beispiel Königswinter

Während des Workshops hat sich die zweite Gruppe, bestehend aus Teilnehmern der Projektgruppe sowie einer Stadtplanerin mit Zuständigkeit für die nachfolgend dargestellte Verkehrszelle mit der konkreten Situation innerhalb eines Ausschnitts von Königswinter befasst.

Innerhalb des hervorgehobenen Bereichs sind mit farblichen Punkten verschiedene POIs erkennbar. Aufgrund des Algorithmus wurden neun potenzielle Ladestationen berechnet, die die POIs in Clustern abdecken. Davon entfallen acht potenzielle Ladepunkte auf Bereiche, die in unmittelbarer Rheinnähe liegen. Einige dieser acht Ladepunkte wurden für den Innenstadtbereich von Königswinter berechnet.

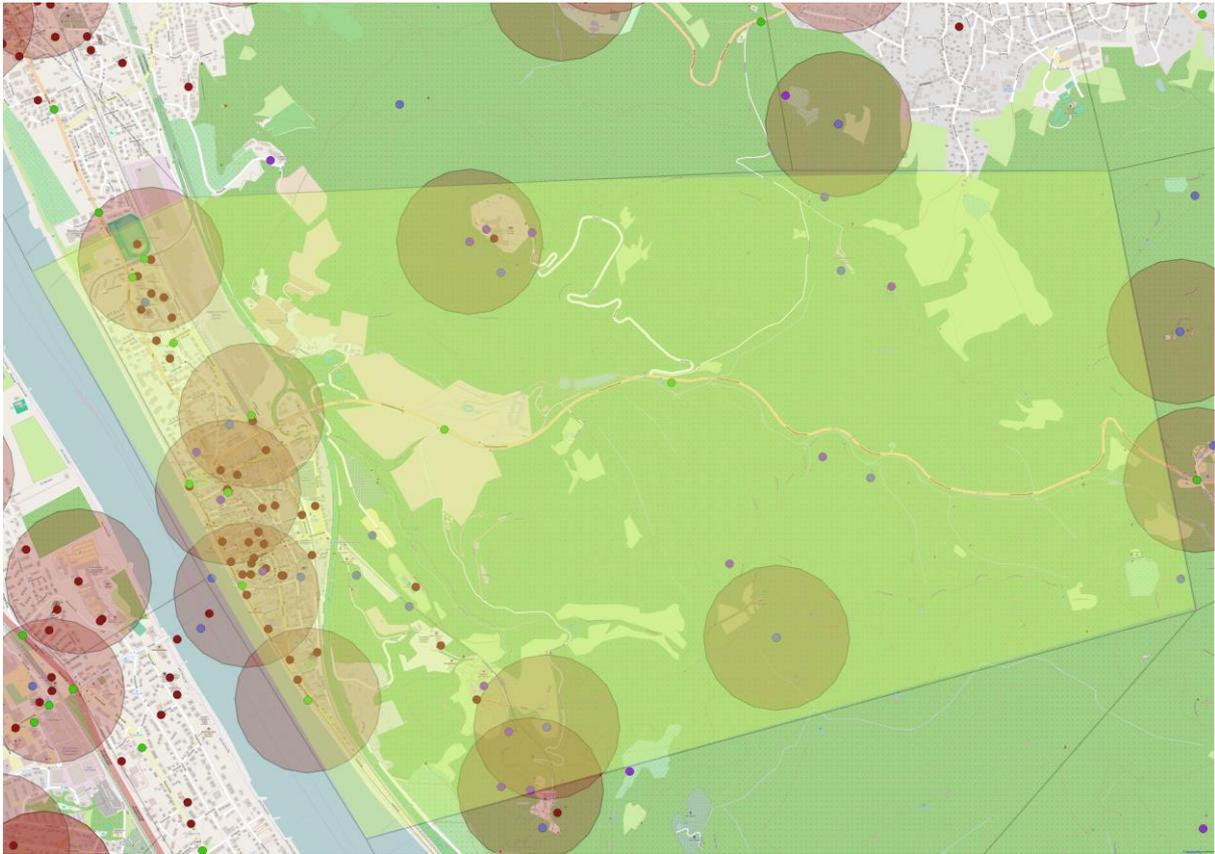


Abb. 14: Verkehrszelle Königswinter. Quelle: Rhein-Sieg-Kreis Die Ergebnisse der Optimierung sind als Kreise mit 300m Radius eingezeichnet. Die farbigen Punkte markieren die Points of Interest und die ÖPNV-Verknüpfungspunkte, die der Optimierung zugrunde lagen.

Im Rahmen der ca. 30-minütigen Gruppendiskussion wurden Fragen bzgl. der Umsetzung und Sinnhaftigkeit der Positionierung der Ladepunkte von allen Gruppenteilnehmern an die lokale Stadtplanerin gestellt. Im Ergebnis kam sie rasch zu der Einschätzung, dass aufgrund des latenten Überschwemmungsrisikos, dem hohen Grundwasserspiegel, der Enge der Straßen und Wege in das Zentrum Königswinters (mögliche Verbauung von Rettungswegen) sowie der bereits erfolgten Bepflanzung eines derzeitigen Parkplatzes (Schotterfläche), keine der acht errechneten Flächen in Betracht kommt.

Mögliche Flächen für Ladepunkte lägen weiter entfernt und erforderten einige Umbaumaßnahmen. Der Ausschluss der genannten Flächen erfolgte hinsichtlich des Baus für E-Auto-Ladepunkte. Für E-Bikes können aufgrund des geringeren Platzbedarfs und geringerer technischer Erfordernisse vermutlich alle Punkte in Betracht gezogen werden. Die überwiegende Zahl der Gruppenteilnehmer schloss sich der Einschätzung der Stadtplanerin an.

Die finalen Ergebnisse des Algorithmus (inkl. Verkehr) schlagen auch Ladesäulen am Bahnhof in Königswinter und am Park-&-Ride-Platz Longenburg vor. Dort gelten die genannten Ausschlusskriterien nicht, da sich dort asphaltierte bzw. gepflasterte Parkplätze befinden, welche weder in engen Gassen noch in Rheinnähe sind (siehe Abb. 14). Vorgeschlagene Ladesäulen auf dem Petersberg und am Drachenfels müssten näher untersucht werden.

6 Diskussion und Ausblick

6.1 Einschätzung der Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Ergebnisse auf Plausibilität hin geprüft werden. Dies geschieht anhand der kleinsten Ausbaustufe (256 Ladesäulen) für E-Autos über das inkrementelle Verfahren. Allgemein führen die Ergebnisse der Optimierung, in welchen sowohl die POIs als auch die Verkehrsentstehung und -reduzierung in den Verkehrszellen berücksichtigt wurden, zu plausibleren Ergebnissen. Betrachtet man hingegen die Ergebniskarten, bei denen nur die POIs berücksichtigt wurden, werden einige Bereiche stärker über- oder unterrepräsentiert, als es für sinnvoll erachtet wird.

Es fällt auf, dass bereits für die geringste Ausbaustufe fast alle Bereiche der Region Bonn-Rhein-Sieg mit Ladesäulen abgedeckt sind. Nur in einigen wenigen Gebieten werden gar keine Ladesäulen vorgeschlagen. Beispiele dafür sind der Kottenforst, die Waldville, das Gebiet um die Wahnbachtalsperre und der Flughafen Köln-Bonn. All diesen Gebieten ist gemeinsam, dass sie größtenteils nicht für den Autoverkehr freigegeben sind (siehe blaue Umrandungen in Abb. 15). In fast allen befahrbaren Verkehrsbereichen hingegen besteht bereits in diesem ersten Ausbauszenario die Möglichkeit, Elektroautos aufzuladen. Auch zeigen die Ergebnisse, dass in zentralen Bereichen und an besonders stark frequentierten Verkehrsachsen mehr Bedarf für Ladesäulen besteht. Dies gilt insbesondere für die Städte und Gemeinden Bonn, Königswinter, Sankt Augustin, Siegburg, Troisdorf und Rheinbach (siehe grüne Umrandungen in Abb. 15). Aber auch am Phantasialand ist ein Schwerpunkt zu erkennen, was aufgrund der hohen Besucherzahlen und Langzeitparker sinnvoll erscheint. Ferner ist erkennbar, dass an wichtigen Bahntrassen besonders viele Ladesäulen vorgeschlagen werden, z.B. zwischen Bonn und Siegburg, zwischen Hennef und Troisdorf, zwischen Bonn, Bornheim und Brühl und entlang der Rheinachse. Oft sind die Ladesäulenschwerpunkte auch da, wo das relative Verkehrsaufkommen besonders hoch ist. Ballungen von POIs verzerren diese Tendenz aber an der einen oder anderen Stelle, wie z.B. nördlich von Ruppichteroth und in Königswinter. Umgekehrt gibt es Gebiete mit sehr hohem relativen Verkehrsaufkommen, in denen kaum oder keine Ladesäulen vorgeschlagen werden, wie z.B. ein Bereich in der Nähe von Duisdorf oder berechtigterweise der Flughafen Köln-Bonn und der Bereich um die Wahnbachtalsperre.

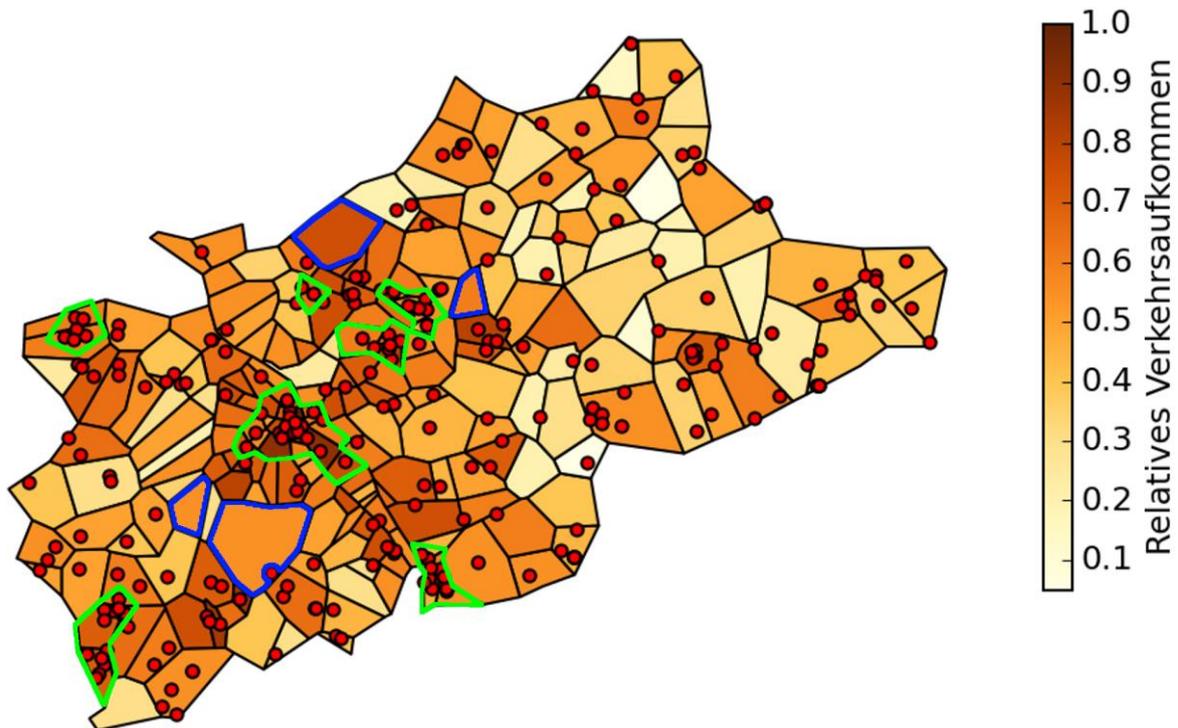


Abb. 15: Inkrementelle Lösung der ersten Stufe (E-Auto-Ladestationen unter Berücksichtigung der Verkehrsdichte). Grün: hohe Dichte, blau: niedrige Dichte.

Problematisch sind die Ergebnisse dahingehend, dass die Städte und Gemeinden ihre POIs nicht in verhältnismäßig gleichem Umfang bzw. nicht immer in den gleichen Kategorien zur Verfügung gestellt haben. Es muss davon ausgegangen werden, dass es deutlich mehr POIs gibt, als in der vorliegenden Studie zugrunde gelegt. Eine qualitative Verbesserung der Ergebnisse würde sich u.a. ergeben, wenn auch POIs in anderen Kategorien, wie z.B. Geschäfte oder Arbeitgeber einbezogen worden wären. Durch die Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens, welches in den einzelnen Verkehrszellen entsteht, bzw. versinkt, wurden zwar deutliche Verbesserungen im Ergebnis erreicht, aber es besteht weiteres Potential, z.B. durch die Betrachtung realer Verkehrsflüsse in einer größeren raumzeitlichen Auflösung. Insgesamt aber lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der vorliegenden Optimierung eine gute Grundlage für den weiteren Planungsprozess bieten.

Ähnliches gilt für die vorgeschlagenen E-Bike-Stationen. Aufgrund der Annahme, dass das zukünftige Verkehrsaufkommen von E-Bikes sich am Verkehrsaufkommen des Autoverkehrs orientiert, besteht auch hier Verbesserungspotential. Für Distanzen über 20km sind aktuell die Ergebnisse verzerrt. Da es sich jedoch bei dem Großteil der Fahrten um Kurzstrecken handelt, sind die aktuellen Ergebnisse dennoch eine gute Planungsgrundlage, die allerdings durch die Berücksichtigung tatsächlicher und prognostizierter Radverkehrsströme in hoher raumzeitlicher Auflösung verbessert werden könnte. Insbesondere die Prognose der Verkehrsentwicklung für E-Bikes ist hier ein

wichtiger Teilaspekt. Da durch E-Bikes auch Steigungen besser bewältigt werden können, wäre es falsch, allein den heutigen Radverkehr als Grundlage für die Verteilung von E-Bike-Stationen zugrunde zu legen.

Aufgrund der stärkeren Berücksichtigung des Alltagsradverkehrs ist die Ballung entlang der größeren Städte und Bahntrassen, welche bereits für die Verteilung der E-Auto-Ladesäulen beschrieben wurde, recht sinnvoll. Im Einzelfall muss darüber nachgedacht werden, ob E-Bike-Stationen eher an Radwegen gebaut werden sollten, welche etwas abseits parallel zu den Hauptachsen verlaufen; da diese in der Natur liegen.

Allgemein ist festzustellen, dass insbesondere entlang touristisch interessanter Radstrecken weniger E-Bike-Stationen vorgeschlagen werden, als dem vermuteten Bedarf entspricht. So sind in einem größeren Bereich um die Wahnbachtalsperre herum keine E-Bike-Stationen vorgeschlagen, obwohl diese Gegend touristisch sehr attraktiv ist. Auch die Gegend entlang des Grünen C zwischen Sankt Augustin und der Siegmündung wird nicht abgedeckt, obwohl dort ein Bedarf an E-Bike-Stationen angenommen werden kann (siehe blaue Umrandungen in Abb. 16). Im nordöstlichen Bereich ist erkennbar, dass durch die Realisierung der E-Bike-Stationen im Rahmen des Projekts "Bergisch Hoch Vier" auch in Gebieten mit einem geringen relativen Verkehrsaufkommen (Autoverkehr) E-Bike-Stationen angezeigt werden. Dies ist aufgrund des touristischen Radverkehrs auch sinnvoll. Es sollte überprüft werden, in welchen Gegenden, abgesehen vom nordöstlichen Bereich, aus Gründen des Fremdenverkehrs E-Bike-Stationen gefördert werden sollten.

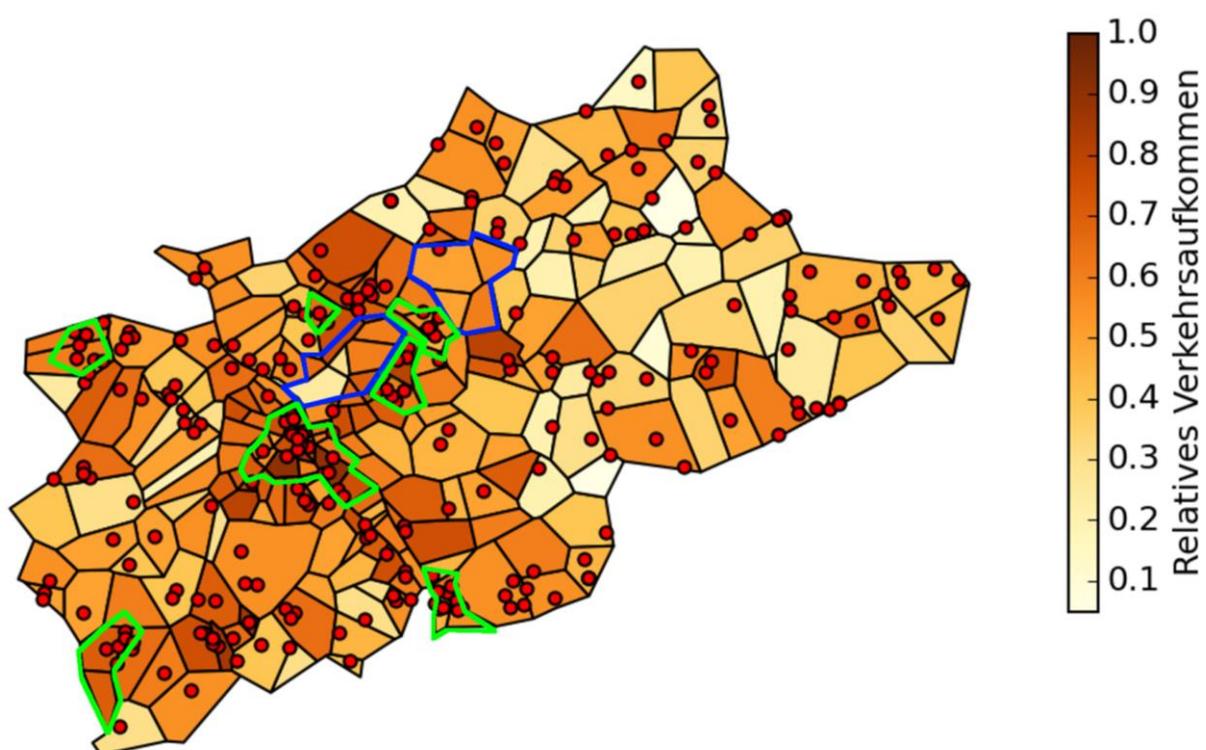


Abb. 16: Inkrementelle Lösung der ersten Stufe (E-Bike-Ladestationen unter Berücksichtigung der Verkehrsdichte). Grün: hohe Dichte, blau: niedrige Dichte.

Im Kapitel 4 wird die Verteilung der potenziellen Ladepunkte anhand des verwendeten Algorithmus deutlich. Wesentlichen Einfluss darauf hat das vorhandene Netz an Verkehrsinfrastruktur, wie in der Abbildung 5 des Kapitels 3.2.2. verdeutlicht. Die durch den Algorithmus errechneten Ladestationen im Gebiet der Stadt Bonn und des Rhein-Sieg-Kreises knüpfen grundsätzlich eng daran an. Die Einbeziehung von Verkehrsdaten ergibt kein wesentlich verändertes Bild, da diese Daten entlang bestehender Verkehrslinien und -knoten entstanden sind.

Dabei ist einerseits ein wesentlicher Schwerpunkt in Bonn und den benachbarten Kommunen Siegburg, Sankt-Augustin, Königswinter und Bad Honnef zu erkennen (Verdichtungsraum), andererseits kristallisieren sich im Kreisgebiet Schwerpunkte für Ladestationen an Hauptverkehrspunkten heraus. Dies liegt darin begründet, dass aus dem Umland (Kreisgebiet) starke Pendlerverflechtungen in den Verdichtungsraum in Ost-West-Richtung bestehen.

Hinzu kommen einzelne "Inseln" mit größeren Anzahlen errechneter Ladepunkte, die in den Kreiskommunen Windeck, Bornheim, Meckenheim und Rheinbach auftreten. Bei der Betrachtung der Abbildung zur Anzahl der potenziellen Ladestationen je Quadratkilometer treten in einzelnen Verkehrszellen der Kommunen Bonn, Siegburg, Bad Honnef, Bornheim, Bad Honnef und Ruppichterath erhöhte Dichten auf. Bezogen auf die absolute Anzahl an Ladestationen je Quadratkilometer, weisen Verkehrszellen in Ruppichterath, Windeck, Eitorf und Bornheim höhere Werte auf. Unterschiede in der Verteilung resultieren aus der Größe der Verkehrszellen und den verwendeten Einflusskriterien.

Neben dem dargestellten Netz an ÖPNV-Strukturen gemäß Abb. 5 sind die Strukturen des MIV ähnlich, wobei es auch zu Verkehrsströmen in nördlicher Richtung (Kölner Raum) kommt. In östlicher und südlicher Richtung sind aus dem Verdichtungsraum keine nennenswerten Abflüsse zu erkennen, da die nächsten Wirtschaftszentren außerhalb des Tagespendlerbereichs liegen.

6.2 Ausblick

Die vorhergehenden Ausführungen stellen eine mögliche Strategie zur sukzessiven Errichtung von Ladeinfrastruktur dar. Ein Fokus der Planung ist die Orientierung an Pendlerstrukturen und die Abdeckung des Ladebedarfs in Parksituationen, da der Ladeprozess in der Elektromobilität, bei aktuellem Stand der Technik, mit signifikanten Wartezeiten verbunden ist. Hier könnten weitere Verbesserungen durch zusätzliche und höher aufgelöste Daten erreicht werden. So stehen nicht für alle Kommunen im Untersuchungsgebiet die jeweiligen Pols in gleichem Umfang und gleicher Qualität zur Verfügung. Hier besteht noch Verbesserungspotential. Gleiches gilt für die räumliche Auflösung der Verkehrsdichtedaten für das Stadtgebiet Bonn. Außerdem könnten durch Gebietstypisierungen solche Orte identifiziert werden, in denen es eine größere Zahl von Laternenparkern gibt oder eine hohe Anzahl an Arbeitsplätzen, d.h. an denen mit einer entsprechenden Nachfrage nach öffentlicher Ladeinfrastruktur zu rechnen ist.

Auch hier sind durch verbesserte und vollständigere Inputdaten bessere Ergebnisse für das idealisierte Raster zu erwarten

Bei zukünftigen Strukturanalysen, die die Einführung von E-Mobilität und Ladepunkten untersuchen, wäre sicherlich eine erheblich verbesserte Datenbasis empfehlenswert. Ein gutes Beispiel der detaillierten Erfassung von Raumeinheiten stellt das Vulcan Project¹⁵ der Arizona State University dar. Das Team um Professor Kevin Gurney hat in Zusammenarbeit mit der NASA bereits 2002 verschiedene Großräume der USA detailliert mit Hilfe von Satellitenbildern ausgewertet. Das beeindruckende Ergebnis basiert dabei allerdings auf der in angelsächsischen Ländern üblichen leichten Verfügbarkeit von Raumdaten zu relativ geringen Kosten. Die bei der Bezirksregierung Köln und dem GeoServer des Landes NRW verfügbaren Bilddaten sind momentan derart kostspielig (Preis pro Bild in Euro im drei- bis vierstelligen Bereich, hinzu kommt die Wahrung von Persönlichkeitsrechten etc.), dass mit der Arizona State University vergleichbare Analysen vorerst undenkbar sind. Dies betrifft auch die Verfügbarkeit von sozio-ökonomischen Daten sowie die Verknüpfung dieser mit Satelliten-Daten.

Neben den zuvor genannten Oberflächendaten wäre es für zukünftige Analyse auch wünschenswert, die Netzpläne inklusive Kapazitäten der Versorger-Unternehmen zu kennen. Dies würde die Planung sicherlich realistischer gestalten.

Kenntnisse über reale Parkzeiten und Reichweiten von Elektrofahrzeugen würden ebenfalls zu realistischeren Ausbauszenarien beitragen. Reichweitenbestimmende Faktoren sind dabei Fahrzeug- und Batterietechnik, Wetter und Jahreszeit, sowie Topographie und Fahrverhalten. Literaturrecherchen haben gezeigt, dass solche Erkenntnisse meist nur auf Fahrzeugzyklen weniger Fahrzeuge beruhen und mehrheitlich solche Erkenntnisse aus dem nicht-deutschen Raum stammen. Alle diese Studien dokumentieren jedoch eindeutig den Unterschied zwischen tatsächlichen Reichweiten und von Autoherstellern angegebenen und auf idealisierten Fahrzyklen beruhenden Reichweiten. Daten über reale Reichweiten konkreter Fahrzeuge gekoppelt mit realen räumlich und zeitlich gut aufgelösten Verkehrsflussdaten würden es erlauben, ein wesentlich verbessertes idealisiertes Raster mittels FLCP zu erstellen.

Ein weiterer in dieser Studie nicht weiter beleuchteter Aspekt ist die Frage nach der Nutzerakzeptanz. Diese ist abhängig von Sichtbarkeit, Erreichbarkeit, Zugang und Preis. Dabei ist die Zahlungsbereitschaft der potentiellen Nutzer ein wichtiger Parameter der Rentabilitätsbetrachtung für einen Ladesäulenstandort. Dieser Aspekt wurde in der vorliegenden Studie bisher nicht explizit berücksichtigt. Die Nutzerakzeptanz eines Standortes wird aber auch durch die Sichtbarkeit der Ladestation bestimmt. Hierzu gehört die effektive Kommunikation vorhandener und geplanter Standorte. Die Berücksichtigung der Ladeinfrastruktur in Karten, auf Webseiten, in speziellen Apps und in Broschüren gehört ebenso dazu, wie Informationsveranstaltungen und geführte Touren zu Ladeinfrastrukturstandorten. Vor Ort können Hinweisschilder oder integrierte Solaranlagen dazu beitragen, die Ladeinfrastruktur sichtbarer zu machen. Vor allem

¹⁵ Homepage des Vulcan Project: <http://vulcan.project.asu.edu/GEarth/index.html>

E-Bike-Stationen werden häufig nicht direkt wahrgenommen, da sie recht klein sind, sich hinter Ecken befinden oder andere Objekte die Sichtbarkeit solcher Stationen einschränken. Teilweise sehen diese wie gewöhnliche Radabstellanlagen aus und erst bei genauem Hinsehen können die Steckdosen entdeckt werden. Die im Rahmen dieses Projekts erstellte interaktive Karte¹⁶, inklusive einer Auflistung aller E-Bike-Stationen in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis sind frei verfügbar und dürfen auch an anderer Stelle veröffentlicht werden. Die Standorte der Ladeinfrastruktur für E-Autos können im Internet^{17,18} abgerufen werden. Eine nutzerfreundliche Bereitstellung dieser Information erhöht die Akzeptanz und fördert die Nutzung bestehender und zukünftiger Ladestationen.

Insgesamt ist die vorliegende Studie somit ein wichtiger Ausgangspunkt für die sukzessive Planung und Umsetzung einer flächendeckenden, bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis. Darüber hinaus ergibt sich ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Hinblick auf eine Verbesserung der Planungsgrundlagen. Die Ausgangsdaten für die Erstellung des idealisierten Rasters und die mögliche Verwendung eines FLCP-Ansatzes mit realen Verkehrsflussdaten eröffnet hier weitere Möglichkeiten. Ein zusätzlicher Bedarf ergibt sich in der Begleitung der konkreten Umsetzung im Rahmen der Detailplanung und Realisation einzelner Projekte. Hier stellen gute Monitoring- und Evaluations- und Kommunikationskonzepte eine weitere Herausforderung für Forschung und Entwicklung dar.

¹⁶ Interaktive Karte der E-Bike-Stationen der Region Bonn-Rhein-Sieg: <http://kleines-klimaportal.de/ladestationen-fuer-e-bikes-im-rhein-sieg-kreis-und-in-bonn.html>

¹⁷ www.lemnet.org

¹⁸ www.e-tankstellen-finder.com

7 Anhang

7.1 Literaturverzeichnis

Albareda-Sambola, M.; Fernández, E.; Hinojosa, Y.; Puerto, J.; “The multi-period incremental service facility location problem,” *Computers & Operations Research*, vol. 36, no. 5, pp. 1356–1375, May 2009.

Angenendt, Nicole; Müller, Christine; Stronzik, Marcus (2012): *Elektromobilität in Europa: Ökonomische, rechtliche und regulatorische Behandlung von zu errichtender Infrastruktur im internationalen Vergleich*. Bad Honnef

Beckmann, Klaus J. (2013): *Integrierte Stadt- und Verkehrsentwicklung — Chancen und Anforderungen des Elektroverkehrs für die Städte*, in: Katharina Boesche u.a. (2013): *Berliner Handbuch für Elektromobilität*, München.

Beckmann, Klaus J., Bastian Chlond, Tobias Kuhnimhof, Stefan von der Ruhren, Dirk Zumkeller (2006): *Multimodale Nutzergruppen — Perspektiven für den ÖV*, in: *Internationales Verkehrswesen*, H. 4.

Berman, O.; Drezner, Z. and Krass, D.; “Generalized coverage: New developments in covering location models,” *Computers & Operations Research*, vol. 37, no. 10, pp. 1675–1687, Oct. 2010.

Bertram, Mathias; Bongard, Stefan (2014): *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr [Elektronische Ressource]: Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich*. Wiesbaden

Bioly, Sascha et al. (2013): *Elektromobilität und Ladesäulenstandortbestimmung - Eine exemplarische Analyse mit dem Beispiel der Stadt Duisburg*. Schriftenreihe Logistikforschung Band 24, 2013. Duisburg

Boesche, Katharina Vera; Fest, Claus; Franz, Oliver; Gaul, Armin [Hrsg.] (2013): *Berliner Handbuch zur Elektromobilität*. München

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2014): *Kompendium für den interoperablen und bedarfsgerechten Aufbau von Infrastruktur für Elektrofahrzeuge - ÖFFENTLICHE LADEINFRASTRUKTUR FÜR STÄDTE, KOMMUNEN UND VERSORGER*. Berlin (http://sax-mobility.de/wp-content/uploads/2014/03/Oeffentliche_Ladeinfrastruktur_fuer_Staedte__Kommunen_und_Versorger.pdf , Abruf 15.01.2015)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2009): Wettbewerbsdokumentation „Innovative öffentliche Fahrradverleihsysteme“. Neue Mobilität in Städten, Berlin (<http://www.nationaler-radverkehrsplan.de/fahrradverleihsysteme>, Abruf 17.12.2014)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011a): Ergebnisbericht 2011 der Modellregionen Elektromobilität. Berlin (http://www.elektromobilitaet.nrw.de/editor/Downloads/Modellregion_Rhein_Ruhr/Ergebnisbericht_Modellregionenprogramm_Phase_I_2011.pdf , Abruf 01.02.2015)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011b): Modellregionen Elektromobilität. Vorbereitung und Integration von Elektrofahrzeugen in das Fahrzeugangebot des Carsharing-Anbieters Cambio. Schlussbericht, Berlin.

Bundesverband Carsharing (BCS) (2013): Wie viele Elektrofahrzeuge verträgt die Car-Sharing-Flotte? Berlin (<http://www.carsharing.de/alles-ueber-carsharing/studien/wie-viele-elektrofahrzeuge-vertraegt-die-carsharing-flotte>, Abruf 25.02.2015).

Canel, C.; Khumawala, B. M.; Law, J.; A. Loh, “An algorithm for the capacitated, multi-commodity multi-period facility location problem,” *Computers & Operations Research*, vol. 28, no. 5, pp. 411–427, Apr. 2001.

Chlond, Bastian (2013): Multimodalität und Intermodalität, in: Klaus J. Beckmann und Anne Klein-Hitpaß (Hrsg.): *Nicht weniger unterwegs, sondern intelligenter? Neue Mobilitätskonzepte*, Berlin (Edition Difu — Stadt Forschung Praxis, Bd. 11).

Church, Richard; ReVelle, Charles. *The Maximal Covering Location Problem*. Emmitsburg, MD: National Emergency Training Center, 1974. Print.

Church, R. L.; Stoms, D. M.; Davis, F. W. “Reserve selection as a maximal covering location problem,” *Biological Conservation*, vol. 76, no. 2, pp. 105–112, 1996.

Clausen, Uwe (2013): *Innovative Mobilitätskonzepte im Güter- und Wirtschaftsverkehr*, in: Klaus J. Beckmann und Anne Klein-Hitpaß (Hrsg.): *Nicht weniger unterwegs, sondern intelligenter? Neue Mobilitätskonzepte*, Berlin (Edition Difu — Stadt Forschung Praxis, Bd. 11).

Daimler AG (2011): *Abschlussbericht Verbundprojekt IKONE. Integriertes Konzept für eine nachhaltige Elektromobilität*, Stuttgart.

DB Rent (2011): *Schlussbericht „Pedelec Stuttgart“*, Stuttgart.

Deutscher Bundestag (2012): Förderung der Elektromobilität im öffentlichen Personennahverkehr. BT-Drs. 17/ 9846, Berlin (<http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/098/1709846.pdf>, Abruf 25.02.2015)

Deutsches Institut für Urbanistik (Hrsg.) (2014): Elektromobilität in der Stadt- und Verkehrsplanung, Berlin (<http://www.difu.de/publikationen/2014/elektromobilitaet-in-der-stadtund-verkehrsplanung.html>, Abruf 20.02.2015)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (2015): DLR wertet größte und umfangreichste Studie über Erstnutzer von Elektroautos aus, http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-13726/#/gallery/14080 (letzter Abruf am 05.06.2015).

Droste-Franke, B.; Paal, B.P.; Rehtanz, C.; Sauer, D.U.; Scheider, J.-P.; Schreuers, M.; Ziesemer, T. (2012): Balancing Renewable Electricity – Energy Storage, Demand Side Management and Network Extension from an Interdisciplinary Perspective, Ethics of Science and Technology Assessment, Springer-Verlag, Vol. 40

EWE (2011): EWE Flottenversuch Elektromobilität. Schlussbericht Teil 1—2, Oldenburg.

Fachhochschule Frankfurt am Main (2011): Fachgruppe Verkehrsplanung und Öffentlicher Verkehr. Sozialwissenschaftliche Begleitforschung zur Elektromobilität in der Modellregion Rhein-Main, Frankfurt am Main.

Farahani, R. Z. ; Asgari, N.; Heidari, N.; Hosseini, M. and Goh, M.; “Covering problems in facility location: A review,” Computers & Industrial Engineering, vol. 62, no. 1, pp. 368–407, Feb. 2012.

Fojcik, Thomas Martin; Proff, Heike (2010): Elektromobilität 2010 – Wahrnehmung, Kaufpräferenzen und Preisbereitschaft potentieller E-Fahrzeug-Kunden (www.cama-automotive.de/templates/studies/CAMA_Studie_009.pdf, Abruf 10.01.2015)

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (FhG IAO) (2011): Elektromobile Stadt. Integration der elektro-mobilen Infrastruktur in die Stadtentwicklung, Stuttgart.

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (FhG IAO) (2012): Strategien von Städten zu Elektromobilität. Städte als Katalysatoren auf dem Weg zur Mobilität der Zukunft, Stuttgart.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge, Langfassung, Karlsruhe (<http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fraunhofer-ISIMarkthochlaufszszenarien-Elektrofahrzeuge-Langfassung.pdf>, Abruf 25.02.2015).

Glötz-Richter, Michael (2013): Carsharing in kommunalen Mobilitätsstrategien, in: Klaus J. Beckmann und Anne Klein-Hitpaß (Hrsg.): Nicht weniger unterwegs, sondern intelligenter? Neue Mobilitätskonzepte, Berlin (Edition Difu — Stadt Forschung Praxis, Bd. 11).

Hodgson, M. John. "A Flow- Capturing Location- Allocation Model." Geographical Analysis 22.3 (1990): 270-279.

Heuer, Markus (2013): Smart-City-Konzepte und ihre Auswirkungen auf die Planung im Verkehrswesen: vom Energiewandel und den einhergehenden Änderungen im Alltag. Hamburg

Hoerstebroek, Tim (2014): Strategische Analyse der Elektromobilität in der Metropolregion Bremen/Oldenburg. Dissertation. Oldenburg

Hoffmann, J. (2013), "Raumplanungskonzept für Fahrzeugwechselstationen und Ladeinfrastruktur zur Nutzung der Elektromobilität im internationalen Personennahverkehr der Stadt Karlsruhe", Diplomarbeit, Geographisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.

Holland, J. H.; Adaptation in Natural and Artificial Systems, 53. 1975, vol. Ann Arbor, p. 211.

Hollerbach, Heike (2013): Elektromobilität und Infrastruktur — Herausforderungen und Hemmnisse aus kommunaler Sicht, in: Klaus J. Beckmann und Anne Klein-Hitpaß (Hrsg.): Nicht weniger unterwegs, sondern intelligenter? Handbuch_postler-22-1-druck.indd 83 22.01.2014 17:19:4284 Neue Mobilitätskonzepte, Berlin (Edition Difu — Stadt Forschung Praxis, Bd. 11).

Huber, Felix, und Ulrike Reutter (2012): Potenziale und mögliche Entwicklungspfade für Elektromobilität in Leipzig und alternative Mobilitätsmaßnahmen, Fachgutachten, Wuppertal/Kaiserslautern.

ifmo-studien Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.) (2008): Mobilität 2025 - Der Einfluss von Einkommen, Mobilitätskosten und Demografie (https://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000223130/ifmo-Studie+%22Mobilit%C3%A4t+2025+%E2%80%93+Der+Einfluss+von+Ein.PDF , [10.02.2015])

infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (2009): Alltagsverkehr in Bonn und dem Rhein-Sieg-Kreis - Ergebnispräsentation am 23. November 2009. Bonn [http://www.rhein-sieg-kreis.de/imperia/md/content/cms100/buergerservice/aem-ter/amt_61/mid_2008_bonn_rhein-sieg-kreis_praesentation_final.pdf [07.04.2015]]

Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS) (2012): Potenziale von Elektromobilität im Radverkehr. Elektromobilität in der integrierten Stadt- und Verkehrsplanung: zum Umgang mit Unsicherheiten, Dortmund.

Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB) — RWTH Aachen (2013): Emove. Projektziele, Aachen (<http://www1.isb.rwth-aachen.de/eMove/index.php?id=ziele>, [24.02.2015]).

Janßen, Henrik (2013): Zukunft Elektromobilität. Deutschland in Hinblick auf Reichweite, Infrastruktur, Kosten sowie Nachhaltigkeit. München

Jenssen, Solveig, Udo Onnen-Weber, Norbert Targan (2012): Intermodalität und Elektromobilität in strukturschwachen Räumen, in: Der Nahverkehr, H. 6.

KIT Karlsruher Institut für Technologie (2012). Deutsches Mobilitätspanel (MOP) - wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen: Bericht 2012: Alltagsmobilität (Herbsterhebung 2011) (daten.clearingstelle-verkehr.de/192/90/MOP_Bericht_11_12.pdf , [02.02.2015])

Kraftfahrt-Bundesamt. (2015). Bestand. www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html.

Kreidler Media (2012): UPS Cargo Cruiser für eine grünere Dortmunder Innenstadt, Dortmund (<http://www.posttip.de/News/24265/ups-testet-cargo-cruiser.html>, Abruf 24.2.2015)

Krems, Josef F. [Hrsg.] (2013): Elektromobilität in Metropolregionen: die Feldstudie MINI-E-Berlin powered by Vattenfall. (=Verein Deutscher Ingenieure: Fortschrittsberichte VDI / 12). Düsseldorf

Kuby, Michael, and Seow Lim. "The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles." *Socio-Economic Planning Sciences* 39.2 (2005): 125-145.

Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, "Mobilität in Nordrhein-Westfalen - Daten und Fakten," Tech. Rep., 2013.

N. P. Elektromobilität, "Ladeinfrastruktur bedarfsgerecht aufbauen," Nationale Plattform Elektromobilität, Tech. Rep., 2012.

Plota, E.; König, D.; Rettberg, F.; Rehtanz, C.(2012): Wirtschaftliche Ladekonzepte von EFlotten unter Berücksichtigung der Integration erneuerbarer Energien, VDE-Kongress „Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft“, Stuttgart, 5.-6. November

Proff, Heike; Fojcik, Thomas Martin (2010): Markenwirkung und Zahlungsbereitschaft im Übergang zur Elektromobilität. Duisburg (www.cama-automotive.de/templates/studies/CAMA_Studie_007.pdf , Abruf 15.01.2015)

Reininger, P.; Iksal, S.; Caminada, A. & Korczak, J.; “Multi-stage optimization for mobile radio network planning,” in Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th, vol. 3, 1999, pp. 2034–2038.

Rhein-Sieg-Kreis (2013): Nahverkehrsplan 2012 Plus, S. 52_ http://www.rhein-sieg-kreis.de/imperia/md/content/cms100/buergerservice/aemter/amt_61/erlaeuterungsbericht_nahverkehr.pdf [07.06.2015]

Rolink, J.; Rehtanz, C.(2013): Large-Scale Modeling of Grid-Connected Electric Vehicles, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, Issue 2, pp. 894-902, Januar

Russfrei fürs Klima (2011): Parkraumbewirtschaftung, <http://www.russfrei-fuers-klima.de/themen/luftreinhaltung-in-st%C3%A4dten/parkraumbewirtschaftung/> [30.06.2015]

Schallaböck, Karl Otto; Carpentier, Rike; Fishedick, Manfred; Ritthoff, Michael; Wilke, Georg (2012): Modellregionen Elektromobilität: Umweltbegleitforschung Elektromobilität. (<http://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/4433>, [15.01.2015])

Scherf, Christian, Josephine Steiner, Frank Wolter (2013): E-Carsharing. Erfahrungen, Nutzerakzeptanz und Kundenwünsche, in: Internationales Verkehrswesen, H. 1, S. 42—44.

Scherf, Christian, und Frank Wolter (2011): Multimodales Mobilitätsmanagement, in: Internationales Verkehrswesen, H. 1, S. 53—57.

Senat der Freien und Hansestadt Hamburg (2014): Masterplan zur Weiterentwicklung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Hamburg. (<http://www.hamburg.de/contentblob/4362700/data/pm-26-082014-masterplan.pdf> Abruf 24.02.2015)

Spath, Dieter (2012): Strategien von Städten zur Elektromobilität. Städte als Katalysatoren auf dem Weg zur Mobilität der Zukunft, Stuttgart.

Spieker, H.; Hagg, A.; Asteroth, A.; Meilinger, S.; Jacobs, V. & Oslislo, A. Successive evolution of charging station placement 2015 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA 2015), 2015

Stadt Aachen (2011): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben „Machbarkeitsanalyse Elektromobiles Oberzentrum und ländliche Region“, Aachen.

Stadt Hamburg (2014): Masterplan zur Weiterentwicklung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Hamburg, <http://starterset-elektromobilitaet.de/sites/default/files/Best%20Practice%20Masterplan%20-%20Hamburg.pdf> (letzter Abruf: 05.06.2015).

Stadt Krefeld (2011): Saubere Flotte für unser Krefeld, Folienvortrag anlässlich der Konferenz „Elektromobilität in Modellregionen — Ergebnisse und Ausblick“, Krefeld.

Stanek, Gabriele [Hrsg.] (2012): Elektromobilität 2012 : erfolgreiche Lösungen für Smart Companies und Smart Cities. Wien

Styczynski, Zbigniew A.; Komarnicki, Przemyslaw; Naumann, Andre [Hrsg.] (2012): Abschlussbericht Harz.ErneuerbareEnergien-Mobility : Einsatz der Elektromobilität vernetzt mit dem RegModharz-Projekt / Konsortium des Projektes Harz.ErneuerbareEnergien-Mobility. Magdeburg

Universität Duisburg-Essen (2011): cologneE-mobil — Simulation und Begleitforschung. Schlussbericht, Essen.

Universität Stuttgart (2011): Elektromobilität vernetzt nachhaltig — Erfahrungen mit Elektromobilität in einer Mittelstadt der BMVBS-Modellregion Stuttgart, Abschlussbericht der Universität Stuttgart IAT, Stuttgart.

Weinberg, Jana (2015): Die zukünftige Entwicklung der straßengebundenen Mobilität in Deutschland. (=Schriftenreihe Technische Forschungsergebnisse; 21). Hamburg

Zarandi, M. F.; Davari, S. and Sisakht, S. H.; “The large scale maximal covering location problem,” *Scientialranica*, vol. 18, no. 6, pp. 1564–1570, 2011.

7.2 Bewertungsmatrix des Masterplan Hamburg

Grundsätzliche Standorteignung (Ausschlusskriterien)		ja	nein	
Hinderungsgründe in Hinblick auf ...				
A.1.	... die Verfügbarkeit der Fläche			
A.2.	... die bauliche und technische Eignung der Fläche (Größe, Zugang, erforderliche Leitungslänge, etc.)			
A.3.	... städtebauliche Belange			
rechtliche Hinderungsgründe in Hinblick auf ...				
A.4.	... den Status der Fläche (in der Bauleitplanung)			
A.5.	... spezielle Schutznormen (Denkmalschutz, Naturschutz, GrünflächenVO, BinnenalterVO)			
Relative Standorteignung				
	... aus Anbieterperspektive	50%	Bewertung 1-5	Ergebnis
B.1	geringer baulicher Aufwand	10%		
B.2	geringer elektrotechnischer Aufwand	10%		
B.3	geringer Aufwand Verwaltungsverfahren	5%		
B.4	Attraktivität/Repräsentativität der Lage, Wahrnehmbarkeit für die Öffentlichkeit	20%		
B.5	Erweiterbarkeit	5%		
	... aus Nutzerperspektive	50%	Bewertung 1-5	Ergebnis
C.1.	Erreichbarkeit, Erkennbarkeit, Zugänglichkeit	10%		
C.2.	Attraktivität als Ladestandort/Zentralität	25%		
C.3.	Verknüpfung zum ÖV und anderen Formen des Umweltverbundes	10%		
C.4.	geringer Parkdruck durch andere Fahrzeuge	5%		
Gesamtpunktzahl				

Abb. 17: Bewertungsmatrix aus dem Hamburger Masterplan zur Weiterentwicklung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge (Stadt Hamburg 2014).

7.3 Weitere Aspekte der Detailplanung

7.3.1 Weitere Aspekte der Standortwahl

Mögliche Hinderungsgründe	Anmerkungen	Beispiele	relevant für E-Auto / E-Bike
Fläche nicht verfügbar	z.B. private Flächen	Privatparkplätze	beides
Fläche ist baulich und technisch nicht geeignet	diverse Gründe möglich	Fläche zu klein, Fläche nicht zugänglich, kein Stromanschluss in der Nähe, Rad- oder Fußwege verlaufen zwischen Ladesäule und Stellplatz (wegen Kabel)	beides, aber eher E-Auto
Hochwassergefährdung	Hochwassergebiet, Sturzflutgefährdet, durch Grundwasseranstieg gefährdet	Flächen in unmittelbarer Nähe zum Rhein oder zu Zuflüssen	beides, aber eher E-Auto
spezielle Schutznormen		Denkmalschutz, Naturschutz, Baumschutzsatzung	beides
Fläche ist Behindertenparkplatz	Umnutzung kommt nicht in Betracht		E-Auto
Status der Fläche in der Bauleitplanung		Außenbereich nach §35 BauGB (es sei denn, Ladesäulen sind privilegierte Vorhaben), Fußgängerzonen (nur E-Auto), Ladezone für Lieferverkehr	beides
enge Gassen	in engen Gassen können Rettungsfahrzeuge an der Durchfahrt gehindert werden, wenn Ladeinfrastruktur die Gasse weiter verschmälert	Teile des Zentrums von Königswinter	beides, aber eher E-Auto
Bäume mit großen Wurzeln befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Parkplätzen	das kann unter Umständen die Stromleitungen beschädigen	Teile der Lennéstraße in Bonn	beides

die Parkplätze sind so gelegen, dass sie bei Hochwasser von Flüssen leicht überflutet werden können, auf den Flächen treten häufig urbane Sturzfluten auf, steigender Grundwasserspiegel überschwemmt Flächen häufig	sofern die Ladeinfrastruktur nicht auf Sockeln installiert wird, die Elektrik in höhere Teile der Anlage verlagert wird, oder ein Not-ausschalter eingebaut wird	evtl. Rheinallee in Königswinter, Rathenauufer und Brassertufer in Bonn	beides
touristische Attraktivität	andererseits wollen Touristen keine weiten Wege zurücklegen	Rheinufer in Königswinter soll aus planerischer Sicht kein Parkplatzschwerpunkt sein	E-Auto
andere städtebauliche Belange			

Tabelle 3. Mögliche Hinderungsgründe für den Bau von Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge (verändert nach Stadt Hamburg 2014).

Aus Anbieterperspektive

Mögliche Favorisierungsgründe	Anmerkungen	Beispiele	relevant für E-Auto / E-Bike
geringer baulicher Aufwand		an Fassaden, Parkhäusern	beides
geringer elektrotechnischer Aufwand		unmittelbar an einer Stromleitung, welche genügend Kapazitäten hat	beides, eher für E-Auto
geringer Aufwand Verwaltungsverfahren		ein EVU realisiert die Errichtung zusammen mit einem Parkhausbetreiber	beides
anstehende Planungen	möglichst kurzfristige Planungen, um schnell eine LIS aufbauen zu können	Viktoriaallee, Fahrradverleihsystem (teils aber mittel- bis langfristig)	beides
Anfragen von Bürgern oder Unternehmen, die bereit sind, an konkreten Standorten Ladeinfrastruktur zu finanzieren			beides
Attraktivität/Repräsentativität der Lage, Wahrnehmbarkeit für die Öffentlichkeit		Ecke Kaiserplatz/Am Hofgarten direkt auf dem ersten Parkplatz	beides
Erweiterbarkeit	bzgl. Fläche und Stromversorgung	P&R-Platz Hangelar Ost	beides

Lage vor einer Steigung	für Steigung wird mehr Strom benötigt	vor der Kennedybrücke, am Fuße des Venusbergs	beides
viel Sonneneinstrahlung	Installation einer Solaranlage möglich	vor allem in ländlichen Bereichen und bei lockerer Bebauung	beides
Parkhäuser, Tiefgaragen, überwachte und wetterfeste Radabstellanlagen	besonderer Schutz vor Vandalismus und Witterung, kostengünstiger, viele Parkplätze, auch halb-öffentliche oder private Anlagen berücksichtigen	Marktgarage, Parkhäuser und Bike-Stationen an Bahnhöfen	beides
ÖPNV-Verknüpfungspunkte	dort wird oft lange geparkt, intermodale Mobilität kann gefördert werden	Bahnhöfe, Haltepunkte	beides
Park-&-Ride-Plätze		an Autobahnauffahrten, an ÖPNV-Punkten	beides
Bike&Ride-Plätze			beides
Fahrradverleihstationen			beides
Parkplätze für Querparker	höhere Qualität der Parkplätze als Parkplätze für Längsparker		E-Auto

Tabelle 4. Weitere Kriterien aus Anbieterperspektive.

Aus Nutzerperspektive

Erreichbarkeit, Erkennbarkeit, Zugänglichkeit	gut beleuchtet, sicher, groß genug, kurze Wege		beides
Attraktivität als Ladeort/Zentralität	nah an Arbeitgebern und anderen POIs, an denen man sich länger aufhält		beides
Verknüpfung zum ÖPNV und anderen Formen des Umweltverbundes			beides
geringer Parkdruck durch andere Fahrzeuge			beides, aber eher E-Auto

Tabelle 5. Weitere Kriterien aus Anbieterperspektive.

7.3.2 Aspekte für die Wahl einer geeigneten Ladestation

E-Autos

Allgemein sollte die Entscheidung, ob herkömmliche Ladestationen oder Schnellladestationen zu errichten sind, davon abhängig gemacht werden, wie lange sich potenzielle Nutzer an den konkreten Standorten aufhalten oder inwiefern Planer die Parkdauer lenken möchten. Es sollten beide Varianten ermöglicht werden. Für Nutzer, welche beispielsweise Arztbesuche tätigen, zum Schwimmbad fahren oder zum Shopping in die Innenstadt fahren, empfehlen sich eher Schnellladestationen, während an Arbeitsplätzen und an ÖPNV-Punkten eher herkömmliche Ladestationen sinnvoll sind. Zudem sollte stärker die Nutzerperspektive berücksichtigt werden, um mehr PKW-Nutzer für die Elektromobilität gewinnen zu können, beispielsweise indem das Nutzerverhalten analysiert wird und die Ergebnisse in die Planungen einfließen.

E-Bikes

E-Bike-Stationen können nicht nur an Standorten bereits bestehenden Radabstellanlagen gebaut werden, sondern auch an anderen Standorten, an denen sich Ankettmöglichkeiten befinden. Es sollten aber auch Stationen an Standorten realisiert werden, an denen sich keine Ankettmöglichkeiten befinden, aber dennoch Fahrräder abgestellt werden oder an denen Radfahrer sinnvollerweise ihre Räder abstellen würden. Hier kommen nicht nur Arbeitsplätze in Betracht, sondern auch öffentliche Einrichtungen, Eisdielen, Restaurants, Cafés, Standorte in Fußgängerzonen und Radwege auf alten Bahntrassen. Alltagsradwege sollen genauso abgedeckt werden, wie touristische Radwege. Wenn sich an besonders attraktiven Standorten keine Stromleitung befindet, sollte darüber nachgedacht werden, eine Leitung dorthin zu legen. Aufgrund des geringen Strombedarfs von E-Bike-Akkus ist es auch möglich, Ladestationen in Straßenbeleuchtungsanlagen zu installieren.

Sonderfälle sind im Einzelnen zu bewerten. So kann vereinzelt auch an Standorten in unmittelbarer Nähe zum Rhein eine Ladestation oder Ladesäule errichtet werden, welche nicht von der Hochwassergefahr betroffen ist, beispielsweise an der Stadtbahn-Haltestelle "Königswinter Fähre/Sea-Life". Auch wenn sich Bäume mit großen Wurzeln direkt an Parkplätzen befinden, können bestimmte Verfahren angewandt werden, die eine Beschädigung von Bäumen oder Leitungen umgehen.

Technik: E-Auto-Lademöglichkeiten

E-Autos können sowohl an Wallboxen laden, welche beispielsweise an Fassaden oder Parkhauswänden installiert werden können und sie können auch an Ladesäulen laden, welche üblicherweise zwei Ladepunkte und somit einen Versorgungsbereich von zwei Parkplätzen haben. Induktive Lademöglichkeiten können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht empfohlen werden.

Aufgrund des geringen Platzbedarfs und Energieverbrauchs sind auch E-Roller sehr zu empfehlen. Zudem sind diese äußerst leise und stoßen im Gegensatz zu herkömmlichen Rollern keine lokalen Emissionen aus. E-Roller können an normalen Schuko-Steckdosen laden.

Technik: E-Bike-Lademöglichkeiten

E-Bikes können entweder an Ladestationen laden, an denen die Akkus abmontiert oder nicht abmontiert werden. So gibt es Ladestationen, bei denen die Akkus über ein Kabel mit einer Steckdose verbunden werden, und es gibt Ladestationen, bei denen die Akkus in Boxen oder Schließfächern verstaut werden, welche entweder mechanisch oder elektronisch zu verriegeln sind. Sicherer vor Vandalismus und Diebstahl sind vermutlich die Versionen, bei denen die Akkus abmontiert werden.

Ladeinfrastruktur in urbanen und ländlichen Bereichen

Eine Studie des DLR ergab, dass ein Großteil der jetzigen E-Auto-Fahrer im kleinstädtischen und ländlichen Umfeld wohnt. Kleinere Städte und Gemeinden im Rhein-Sieg-Kreis sollten daher besonders berücksichtigt werden (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2015)). Obwohl in ländlicheren Bereichen sicherlich ein Großteil der potenziellen Nutzer die Möglichkeit hat, am Wohnort zu laden, sollten Standorte für Zwischenlader errichtet werden. Die Herausforderung besteht darin, dass ländliche Gegenden deutlich disperser sind, als urbane Gegenden. Aber gerade wenn aufgrund einer ausgeprägten Topographie viele Steigungen vorhanden sind, sollte die Ladesäulendichte größer sein, weil die Akkureichweite bei Steigungen stark abnimmt. Vorteile im ländlichen Bereich sind: weniger konkurrierende Nutzungen als in urbanen Bereichen und preiswertere Flächen, die auch in Dorfzentren zur Verfügung stehen oder nutzbar gemacht werden können.

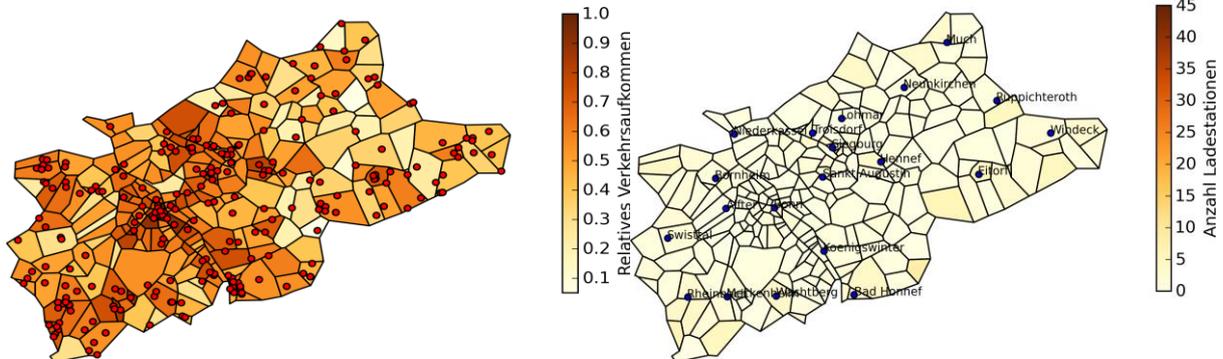
Gegenüber herkömmlichen Fahrrädern haben E-Bikes vor allem in ländlichen Bereichen den Vorteil, dass weitere Strecken und Steigungen ohne größere Anstrengung zurückgelegt werden können. Hier besteht die Möglichkeit, auch in ländlichen Bereichen Verkehr vom MIV auf den Radverkehr zu verlagern. Ein Anreiz hierfür wäre ein Ausbau bzw. eine Verbesserung der Radwege.

7.4 Vollständiges idealisiertes Raster

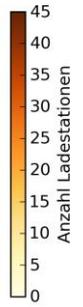
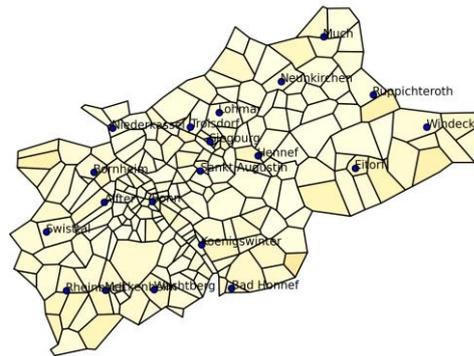
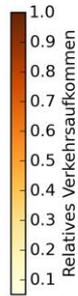
Im Folgenden sind die Ergebnisse aller berechneten Ausbaustufen, sowohl für E-Autos als auch E-Bikes dargestellt. Alle Grafiken und die genauen Koordinaten der platzierten Ladestationen sind auch auf der beiliegenden Daten-CD hinterlegt.

7.4.1 E-Auto

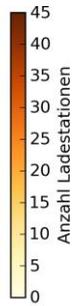
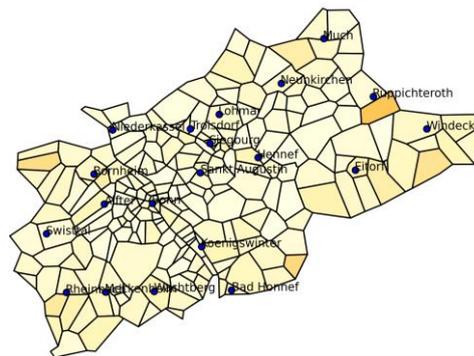
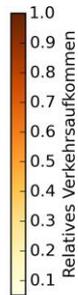
256 Ladestationen



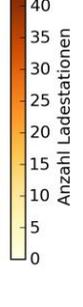
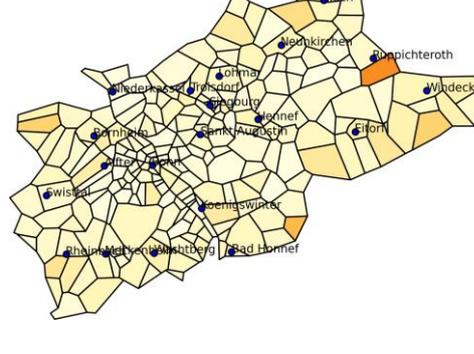
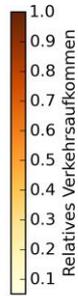
363 Ladestationen



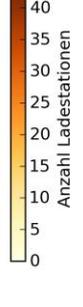
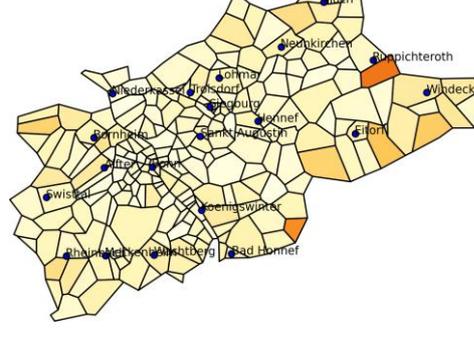
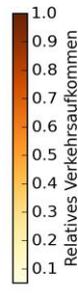
553 Ladestationen



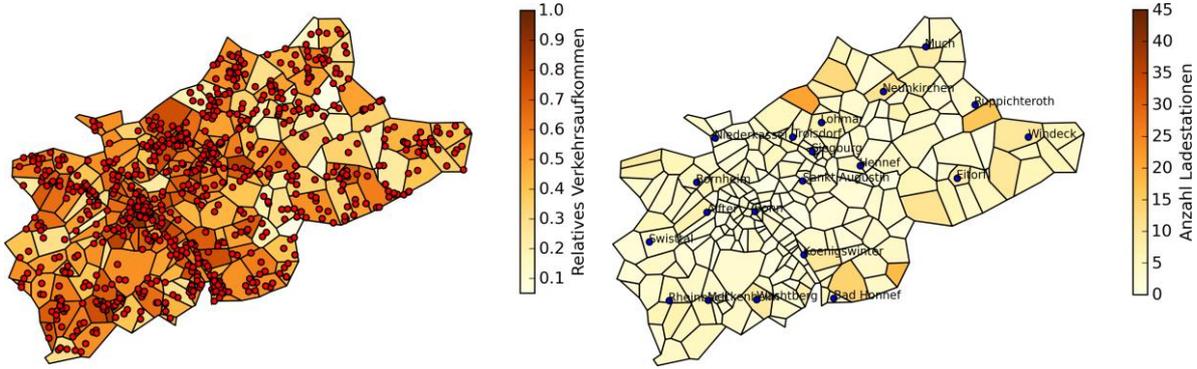
743 Ladestationen



935 Ladestationen



743 Ladestationen



935 Ladestationen

