

# Integrierte Netzplanung für Strom, Gas und Wärme: Konzepte für regionalisierte Szenarien und Netzentwicklung

Daniela Vorwerk\*, Detlef Schulz

Professur für Elektrische Energiesysteme  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr  
Hamburg

Hamburg, Deutschland

\*daniela.vorwerk@hsu-hh.de

Jonathan Vieth

Technische Thermodynamik  
Technische Universität Hamburg  
Hamburg, Deutschland

Johannes Heise, Marwan Mostafa, Christian Becker

Elektrische Energietechnik  
Technische Universität Hamburg  
Hamburg, Deutschland

Natalia Sanina

Fachbereich Elektrotechnik und Informatik  
Technische Hochschule Lübeck  
Lübeck, Deutschland

**Kurzfassung** – Die *integrierte Netzentwicklungsplanung* beschreibt den Prozess für eine gemeinsame strategische Infrastrukturplanung für die leitungsgebundenen Energieträger Strom, Gas und Fern-/bzw. Nahwärme. Im Projekt *iNeP* wird dafür am Beispiel der Industriemetropole Hamburg eine Methodik entwickelt, die eine solche abgestimmte Netzplanung erlaubt. Dabei hat die Erfüllung des Hamburger Klimaplanes höchste Priorität. Als ein zentraler erster Schritt der integrierten Netzplanung dient die Erstellung eines Szenariorahmens, in dem künftige Bedarfe sinnvoll abgeschätzt und darauf aufbauende geeignete Energiekonzepte entwickelt werden. Für die Regionalisierung von Bedarfen können entweder geeignete Top-Down Ansätze verwendet werden, oder auf Basis spezifischer für Hamburg verfügbarer regionaler Daten und gezielter Marktfragen Prognosen auf detaillierterer räumlicher Ebene getroffen werden. Dazu wird der Ansatz „Neutraler Zonen“ vorgestellt. Die als Energiemenge prognostizierten Bedarfe müssen zur Beurteilung der Netzkapazitäten in geeigneter Weise in zu liefernde Leistungen aus den Energienetzen übertragen werden. Hier wird auch die Berücksichtigung von Flexibilität in die Netzplanung thematisiert. Auf dem Szenariorahmen aufbauend geschieht die eigentliche Netzentwicklung. Dazu wird ein Programm zur Erstellung eines Netzmodells aus öffentlichen Daten sowie der Ansatz der Graphentheorie für Multi-Energie-Netze präsentiert.

**Stichworte** – *Sektorkopplung, Multi-Energie-Netze, Energieszenarien, Netzmodellierung*

## NOMENKLATUR

BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klima
DaVe	(Energie-)Datenanalyse und -Verarbeitung
HS	Hochspannung
HöS	Höchstspannung
GIS	Geoinformationssystem
iNeP	Integrierte Netzentwicklungsplanung

MS	Mittelspannung
NEP	Netzentwicklungsplan
NS	Niederspannung
OEP	Open Energy Platform
OSM	Open Street Map
PV	Photovoltaik
QGis	Ehemals Quantum-GIS
RE	Regenerative Energien
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber

## I. EINLEITUNG

Im Zeichen der Energiewende wird mit der Fortschreibung des Hamburger Klimaplanes auch in der großen Hansestadt an der Elbe eine CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion um 95 % bis 2050 angestrebt [1]. Hamburg zeichnet sich dabei durch eine hohe Energiedichte auch aufgrund vorhandener Schwerindustrie aus. Die Erreichung dieser Klimaziele nur mit einem „All-Electric“-Ansatz allein auf das Gebiet des Bundeslandes Hamburg bezogen ist aufgrund der eingeschränkten Fläche für Vor-Ort Erzeugung von regenerativem Strom und des kurzen Zeitfensters insbesondere unter Berücksichtigung des hohen industriellen Energiebedarfs in Hamburg, der bisher noch zu großen Anteilen aus Erdgas gedeckt wird, kaum denkbar. Für den Transport wesentlich höherer Leistung bei einem „All-Electric“-Ansatz müsste nicht nur die Verteilungsnetzebene in Hamburg, sondern auch die Transportnetzebene zwischen den Erzeugungsregionen und der Verbrauchsregion Hamburg sowie die Verbindungen zwischen beiden Ebenen erheblich verstärkt werden.

Die Herausforderungen für eine gemeinsame, über die drei Netzsparten übergreifende Entwicklungsplanung sind vielfältig: neben mangelnder Informationsverfügbarkeit und fehlenden abgestimmten Lastprognosen sind auch infrastrukturelle Unterschiede bei Verbrauchern und Netzen

zu nennen. Wie bereits in [4] aufgezeigt, orientiert sich die Netzplanung bei separaten Planungsprozessen der verschiedenen Energienetze nach unterschiedlichen Kennzahlen, Ansätzen und Erfahrungswerten der Netzbetreiber. Für eine integrierte und damit gemeinsame strategische Netzentwicklungsplanung, bedarf es allerdings möglicherweise anderer geeigneter Kenngrößen und Kriterien. Diesen Herausforderungen wird im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK) geförderten Projekt „iNeP: integrierte Netzentwicklungsplanung für die Energieträger Strom, Gas und Wärme“ begegnet. Beteiligt sind dabei neben den drei städtischen Verteilnetzbetreibern Gasnetz Hamburg GmbH, Hamburger Energiewerke GmbH und Stromnetz Hamburg GmbH die Forschungspartner der Technischen Universität Hamburg, der Technischen Hochschule Lübeck und der Helmut-Schmidt-Universität. In [2] ist die grundlegende Idee einer integrierten Netzplanung bereits als Projektidee angekündigt worden. In [3] wird diese noch einmal aufgegriffen und es wird auf die Zielstellung, speziellen Herausforderungen, sowie die Einbettung des Projektes im Gesamtvorhaben des Norddeutschen Reallabors eingegangen. In [4] ist der Aufbau des Projektes und die geplante Vorgehensweise in Form der Arbeitsmodule einschlägig erläutert und themenverwandte Projekte auf nationaler Ebene vorgestellt worden. Im Rahmen des folgenden Beitrags sollen erste, im Rahmen des Projektes ausgearbeitete, Ansätze für den Prozess der integrierten Netzplanung in *iNeP* dargestellt werden. Dabei wird insbesondere auf Inhalte aus [5] zurückgegriffen. Zunächst wird in Kapitel II kurz das allgemeine methodische Vorgehen der integrierten Netzentwicklungsplanung erläutert. In Kapitel III wird insbesondere Bezug auf den Szenariorahmen genommen. Dazu wird ein Top-Down Ansatz am Beispiel der Verteilung elektrischer Wärmepumpen zur dezentralen Wärmeerzeugung in Hamburg dargestellt. Anschließend wird der Ansatz der neutralen Zonen aus [5] präsentiert. Als Schnittstelle zwischen dem Szenariorahmen und der Netzentwicklung wird anschließend das Thema der „Netzübersetzung“ angesprochen, sowie die Rolle von Flexibilität in der integrierten Netzplanung thematisiert. In Kapitel IV wird die eigentliche Netzentwicklung behandelt. Dazu wird ein Programm zur Generierung von Energieversorgungsnetzen mittels öffentlicher Daten vorgestellt und ein Ansatz für über die Energiesparten Strom, Gas und Wärme übergreifende Lastflussberechnung mittels Graphentheorie vorgestellt [5].

## II. METHODISCHES VORGEHEN DER INTEGRIERTEN NETZENTWICKLUNGSPLANUNG

Der grundlegende Prozess einer integrierten Netzplanung, wie er in *iNeP* angewandt werden soll, ist in ABBILDUNG 1 skizziert. Er besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten, die auch in iterativer Weise noch einmal rückwirkend aufeinander wirken können. Als zentrale Arbeitsschritte sind die *Bedarfsermittlung*, die *Bedarfsdeckung*, die *Netzentwicklung* und schließlich die *Roadmap* zu nennen. Die *Bedarfsermittlung* dient der Verortung und Prognose von reinen Bedarfen der Verbraucher, welche energieträger- und technologieunabhängig ermittelt werden. Die *Bedarfsdeckung* zeichnet sich hingegen schon durch ein festgelegtes Energiekonzept aus – d. h. in diesem Schritt muss eine Verteilung an Technologien gefunden werden, die die zuvor prognostizierten Bedarfe zuverlässig deckt. Die Bewertung dieses Energiekonzeptes unterliegt bestimmten Kriterien, wie

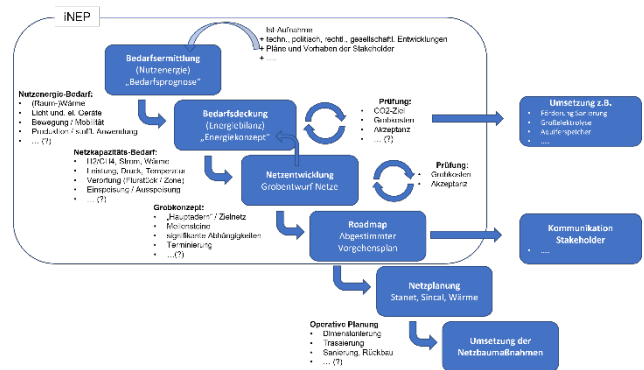


ABBILDUNG 1: SKIZZE ZUR ALLGEMEINEN METHODIK DER INTEGRIERTEN NETZENTWICKLUNGSPLANUNG.

z. B. Kosten, Emissionszielen und Umsetzbarkeit, die von allen Energiesparten gleichermaßen anerkannt werden müssen. Die jeweiligen Kombinationen aus *Bedarfen* und *Deckungskonzepten* bilden den *Szenariorahmen*, welcher Rückschlüsse auf die örtlich zu liefernden Energiearten und -mengen der leitungsgebundenen Energieträger Strom, Gas und Wärme zulässt. Über eine sog. „Netzübersetzung“, d. h. der geeigneten Übertragung von Energiemengen auf Leistungszeitreihen, stellt der *Szenariorahmen* auch die Grundlage für die anschließende *Netzentwicklung* dar. In diesem Arbeitsschritt werden Grobentwürfe für die eigentlichen Netzstrukturen erarbeitet. Im Anschluss an die Prüfung der erarbeiteten Netzausbauvarianten soll wiederum in einem iterativen Verfahren die Modifikation des Energiekonzeptes aus dem vorhergehenden Schritt *Bedarfsdeckung* ermöglicht werden. Für zulässige und nach definierten Kriterien günstige Kombinationen aus Deckungskonzepten und Netzausbauvarianten ergibt sich die *Roadmap* als Entscheidungshilfe und Grundlage für einen abgestimmten Vorgehensplan der Energienetztransformation über alle drei leitungsgebundenen Energieträger. Der in ABBILDUNG 1 aufgeführte Punkt *Kommunikation mit Stakeholdern* beinhaltet sowohl direkte Marktfragen als auch den Dialog über die in der Roadmap dargestellten Bedarfe für Netzentwicklungen als Grundlage für die Entscheidung(hilfe) durch Dritte. Außerdem wird die reale *Umsetzung der Deckungskonzepte* durch die Energienutzer Rückwirkungen auf den Planungsprozess in *iNeP* haben.

Die *operative Netzplanung* und *Umsetzung der Netzausbaumaßnahmen* sind als dem *iNeP*-Prozess nachgelagerte, notwendige Schritte der Netzbetreiber zu verstehen. Hier müssen die durch *iNeP* vorgeschlagenen Ausbauplanvarianten konkretisiert und durch interne Planungsprozesse geprüft werden.

## III. ANSÄTZE FÜR SZENARIORAHMEN UND NETZÜBERSETZUNG

Vor der eigentlichen Überprüfung und Überplanung der Netzentwicklungen stellt die Szenarienentwicklung mit Lastprognosen einen zentralen Bestandteil für Netzplanungsprozesse dar [6]. Hier werden kurz- und langfristige Entwicklungen für Energiebedarfe und Erzeugungskapazitäten abgeschätzt. Die Güte dieses Schrittes hat oft einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der anschließenden Netz(entwicklungs)planung [6]. Auch für die nationalen Netzentwicklungspläne (NEP) der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) für Strom und der Fernleitungsnetzbetreiber Gas werden Szenarien erstellt und als Grundlage für anschließende Maßnahmen zum Netzausbau

herangezogen (s. [7]). Daher kommt dem Szenariorahmen auch in *iNeP* ein großer Stellenwert zu. Im Folgenden wird zunächst dargelegt, warum der Szenariorahmen in zwei Arbeitsschritte für *Bedarfsermittlung* und *Bedarfsdeckung* gegliedert ist. Anschließend wird ein Top-Down-Ansatz für die Prognose von elektrischen Wärmepumpen in Hamburg aufgezeigt. Zudem wird der Ansatz der „Neutralen Zonen“ als Methodik für weitere Regionalisierungen thematisiert. Anschließend wird auf das Thema der Netzübersetzung als Brücke zum Schritt der eigentlichen Netzentwicklung eingegangen. Zuletzt wird die Flexibilität als Element in der integrierten Netzplanung beleuchtet.

#### A. Bedarfsermittlung und Bedarfsdeckung: Warum eine separate Betrachtung?

Wie bereits in Kapitel II erwähnt, werden in *iNeP* für die Sektoren des Verbrauchs die zwei Bearbeitungsschritte *Bedarfsermittlung* und *Bedarfsdeckung* voneinander getrennt behandelt. Die Bedarfsermittlung umfasst dabei nur die Erfassung und Prognose reiner Bedarfe – z. B. nach Raumwärme, warmem Wasser, Kühlung, Mobilität und der Versorgung von Haushaltsstromgeräten etc. Damit weist ein „Bedarf“ in diesem Fall nicht zwangsläufig die Einheit der Energie auf, sondern im Falle der Mobilität können andere Bedarfsgrößen, z. B. Personenkilometer, auftreten. Diese Betrachtungsweise erlaubt zunächst eine energieträger- und technologieunabhängige Definition und Vorhersage von Bedarfen. Diese Bedarfe sind teilweise technisch zu beeinflussen, z. B. kann die Senkung von Raumwärme- und Kühlleistungsbedarfen durch bauliche Maßnahmen erreicht werden. Das zur Deckung der Bedarfe konzipierte *Deckungskonzept* entscheidet über die Art der eingesetzten Technologien und somit über den dafür einzusetzenden Energieträger. Zum Bedarfsdeckungskonzept gehören neben den gängigen verbraucherseitigen Endenergiegeräten im Haushalt (z. B. Gaskessel oder Wärmepumpen) auch zentrale und dezentrale Einheiten der Energieerzeugung (PV, Windenergieanlagen, Solarthermie, konventionelle Kraftwerke), Speicherung (Batterie-, Gas-, Warmwasserspeicher) und Wandlungstechnologien (Elektrolyseure und Brennstoffzellenkraftwerke). Die isolierte Betrachtung von Bedarfen und ihren Deckungskonzepten birgt den Vorteil, dass bei der Erstellung eines Energiekonzeptes als Zielgröße noch alle Freiheitsgrade, die durch die bestehende Technologievielfalt gegeben sind, zur Verfügung stehen. Diese Freiheitsgrade werden dann durch den bestehenden Status Quo des Deckungskonzeptes, sowie bestimmte Randbedingungen und Bewertungskriterien u. a. zur Machbarkeit, eingeschränkt. Außerdem können durch bestimmte beobachtete Trends für Technologieentwicklungen Abschätzungen über die Häufigkeiten getroffen werden. Im folgenden Abschnitt wird dazu eine Teilbetrachtung über elektrische Wärmepumpen in Hamburg aufgezeigt.

#### B. Teilbetrachtung elektrische Wärmepumpen

Um den zukünftigen Bedarf an elektrischer Energie im Bundesland Hamburg abschätzen zu können, soll die Anzahl an Wärmepumpen prognostiziert werden. Verschiedene Studien (z.B. [8], [9], [10], [11]) geben Prognosen für die Anzahl an Wärmepumpen in Deutschland bis zum Jahr 2045 oder 2050 ab. Im Folgenden sollen diese Prognosen auf das Bundesland Hamburg übertragen werden. Dafür wird sich der Methodik zur sektoralen Landkreisregionalisierung aus [11] bedient. Diese Methodik rechnet anhand der gewichteten Indikatoren *Bevölkerung*, *Anzahl Haushalte*, und *verfügbares*

TABELLE I: INDIKATOREN DER REGIONALISIERUNG UND DEREN GEWICHTUNG INKLUSIVE DER WERTE FÜR DEUTSCHLAND UND HAMBURG.

Indikatoren	Quelle	BRD	HH	Gewichtung
Bevölkerung (2020)	[12]	83 155 031	1 852 478	0,35
Anzahl Haushalte (2021)	[13]	40 683 000	980 000	0,1
Verfügbares Einkommen in Mio. € (2019)	[14]	1 969 815	47 596	0,05
Anzahl dezentraler Erzeuger in Mio. (2019)	[15]	7,9002	0,076806	0,25
Anzahl WP in Mio. (2019)	[15]	0,6426	0,004769	0,25

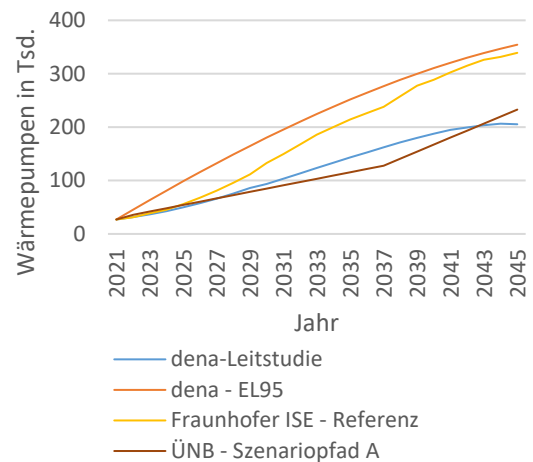


ABBILDUNG 2: PROGNOSE DER ANZAHL AN WÄRMEPUMPEN IM BUNDESLAND HAMBURG AUS VERSCHIEDENEN STUDIEN.

*Einkommen* die Anzahl an Wärmepumpen in Deutschland auf jeden Landkreis um. Da Hamburg deutlich dichter besiedelt ist als die Mehrzahl der restlichen Bundesländer, werden die Indikatoren der ÜNB um die Indikatoren *aktuelle Anzahl an Wärmepumpen* und *Anzahl dezentraler Erzeuger* ergänzt (s. TABELLE I). Anhand des Verhältnisses der Indikatoren für Deutschland und Hamburg können die Prognosen für Deutschland auf Hamburg umgerechnet werden. Die Ergebnisse der Regionalisierung sind für einige Prognosen in ABBILDUNG 2 dargestellt.

#### C. Regionalisierung für die integrierte Szenarienerstellung und Netzplanung in neutralen Zonen

Für einen Energiesparten übergreifenden Ansatz auf Verteilnetzebene bedarf es einer geeigneten und diskriminierungsfreien regionalisierten Betrachtung des zu untersuchenden Energiesystems. In mehreren nationalen Studien wie [9] und [16] wird Deutschland hinsichtlich Verbrauchersektoren, Potenzialen, Technologiemixe, Versorgungskapazitäten als Ganzes betrachtet, in [15] wird die Verteilung an Heizgeräten für Hamburg insgesamt angegeben. Da diese Betrachtung für die Netzplanung auf Verteilnetzebene ungeeignet ist, müssen entweder die Ergebnisse vorhandener Studien durch geeignete Top-Down Ansätze, wie bereits in auf Basis bestimmter Indikatoren (s. Absatz III.B) noch weiter regionalisiert werden oder auf Basis vorhandener regionaler Daten örtlich detailliertere Betrachtungen vorgenommen werden. Durch die speziell für

Hamburg verfügbaren georeferenzierten Informationen aus dem Geoinformationssystem (GIS) sowie aus dem Geo- [17] und Transparenzportal [18] wird der Vorschlag der „Neutralen Zonen“ als ein Bottom-Up-Ansatz eingebracht [5]. Diese Zonen erlauben gezieltere räumliche Betrachtungen – und somit können auch Bedarfsprognosen und Energiekonzepte lokal individueller beschrieben, ausgearbeitet und evaluiert werden.

### 1) Charakterisierung neutraler Zonen

Neben den eigentlich energetischen Aspekten einer „Neutralen Zone“ werden zu deren Charakterisierung auch weitere Aspekte zu Geographie, Demographie, Sozioökonomie und Verkehr, wie in TABELLE II (nach [5]) aufgeführt, herangezogen. Auf dieser Grundlage können einheitlich definierte Kennzahlen nach bestimmten thematischen Aspekten entwickelt werden. Diese sollen einerseits direkte Vergleichbarkeit zwischen den Zonen schaffen und andererseits die mathematische Formulierung funktionaler Zusammenhänge von Größen untereinander ermöglichen. Dabei ist stetig zu analysieren, welche Größen über längere Zeiträume als konstant angenommen werden können, welche im Laufe der Zeit dynamischen Veränderungen unterliegen und wie stark die Abhängigkeit zwischen den betrachteten Größen ausgeprägt ist. Dadurch können Rückschlüsse auf die lokale Transformationsfähigkeit von Gebieten erreicht werden und Aussagen darüber treffen, wie sich bestimmte Trends in einer spezifischen Region ausprägen. Für künftige Prognosen können Formen der Szenariotechnik [19] angewandt werden. Dafür muss berücksichtigt werden, welche Schlüsselfaktoren steuerbar und welche durch äußere Randbedingungen festgelegt sind und somit als gegeben betrachtet werden müssen. Alle Eigenschaften einer Zone werden dabei als über den Zonenbereich homogen angenommen. Dabei sei auch an dieser Stelle die Relevanz benachbarter Zonen zu nennen, denn die Grenzen zwischen zwei Zonen sind für das Modell zwar durch ein oder mehrere formulierte Kriterien festgelegt, haben aber für die Realität der betrachteten Region quasi keine Bedeutung.

TABELLE II: THEMEN UND TEILASPEKTE ZUR CHARAKTERISIERUNG „NEUTRALER ZONEN“ NACH [5].

Thema	Teilaspekte
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installierte Kapazitäten für regenerative Erzeugung, Konventionelle Erzeuger</li> <li>• Wärmedichten</li> <li>• Potenziale für Solarenergienutzung</li> <li>• Wärmenetze</li> </ul>
Sozio-ökonomie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demographie, Altersstrukturen</li> <li>• Spezifische Wohnfläche</li> <li>• Einkommen</li> </ul>
Geographie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundfläche</li> <li>• Flächennutzung</li> <li>• Naturschutzgebiete, Wälder, Gewässer</li> </ul>
Mobilität und Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PKW-Dichte</li> <li>• Öffentlicher Nahverkehr</li> <li>• Öffentliche Ladesäulen</li> <li>• Parkplätze, Parkhäuser, Park &amp; Ride</li> </ul>
Bebauungs- und Verbrauchsstrukturen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl und Größe der Gebäude</li> <li>• Standorte für Gewerbe, Handel, Dienstleistung</li> <li>• Industriestandorte</li> </ul>

### 2) Geographie von Zonen

Als mögliche Ansätze für die Definition von Zonen aus [5] seien im Folgenden die drei verschiedene Ansätze Stadtteile, Raster, und sogenannte „Flexible Zonen“ kurz erläutert.

Die Wahl von Zonen anhand von Stadtteilen bietet den Vorteil, dass für Hamburg bereits weitreichende detaillierte geographische, demographische und sozioökonomische Statistiken in Form der „Stadtteilprofile“ [20] vorliegen. Da diese Profile auch für vergangene Jahre verfügbar sind, lassen sie Untersuchungen über die jüngste Vergangenheit zu und bieten durch die Menge an verfügbaren Daten auch Potenzial zur Analyse der Zusammenhänge und statistische Tests. Auch Prognosen über künftige demographische Entwicklungen sind auf dieser Grundlage verfügbar. Die Stadtteilgrenzen haben allerdings weitestgehend ausschließlich verwaltungstechnischen Hintergrund - und in Bezug auf die Lebensrealität der Einwohner so gut wie keine Bedeutung. Daher sollten z. B. zur Bewertung der Versorgungsqualität einer Zone in Form von Verfügbarkeiten der Nahversorgung und öffentlichen Nahverkehr auch benachbarte Stadtteile berücksichtigt werden. Der Ansatz, jeden Stadtteil als in sich homogene Zone zu betrachten, weist insbesondere für große und Stadtteile mit stark inhomogener Struktur Schwächen auf. Dieser Nachteil tritt beim zweiten Ansatz für Zonengrenzen, die Verwendung von äquidistanten Rastern, nicht auf. Zugängliche GIS-Daten für Hamburg aus [17] können in beide Arten der Zonengestaltung durch Koordinatenvergleiche einfach eingebunden werden. Die Informationen, die nur in Form der Stadtteilprofile vorliegen, können allerdings für die Betrachtung in Rastern nicht direkt übernommen werden, sondern müssen über einen geeigneten Verteilungsschlüssel, z. B. anteilige Anzahl der Wohngebäude oder anteilige Wohnfläche auf diese Ebene übertragen werden.

Für Zonen als Stadtteile und Raster sind die geographischen Grenzen bereits im Voraus festgelegt. Mit dieser Kenntnis können alle verfügbaren Informationen und vorhandenen Objekte identifiziert werden und dienen zur Charakterisierung der Zone. Im Gegensatz dazu steht der Ansatz der „flexiblen Zonen“. Dabei sollen die Grenzen der Zonenbereiche sinnvoll auf Basis einer darin vorkommenden abgeschlossenen homogenen Struktur, z. B. Siedlungen, Schutzgebiete, Industrie- oder Gewerbegebiete etc., festgelegt werden. Die Gestaltung dieser flexiblen Zonen stellt eine große Herausforderung dar, da die Algorithmus-diktierenden Kriterien für den Abschluss einer Zone eindeutig formuliert werden müssen. Für einen ersten Entwicklungsschritt können Flächennutzungspläne dienen. Bei dieser Definition ist zu erwarten, dass die einzelnen Zonen Extrema in ihren Schlüsselfaktoren hinsichtlich der Verbraucherstruktur aufweisen. Eine Schwierigkeit dieses Ansatzes könnte auch hinsichtlich der Größe von Zonen und Gleichzeitigkeiten auftreten – denn je kleiner eine Zone ist und je weniger Verbraucher sich in ihr befinden, desto schwieriger werden belastbare Aussagen über die Gleichzeitigkeit von Lasten und die Anwendung von Standardlastprofilen.

### D. Netzübersetzung

Durch die Arbeitsschritte *Bedarfsermittlung* und *Bedarfsdeckungskonzept* lassen sich zwar die notwendigen zu liefernden Energiemengen ermitteln – für die Auslegung der Komponenten in den Energienetzen für Strom, Gas und Wärme ist allerdings die zu übertragende *Leistung* entscheidend. Konventionelle Planungsansätze richten sich dabei nach der zu erwartenden Höchstlast [21], [22], [23]. Um



von Energiemengen auf Leistungszeitreihen zu schließen, bedarf es einer geeigneten „Netzübersetzung“. Diese kann in ersten Ansätzen durch Erfahrungswerte des Verbraucherverhaltens anhand von Standardlastprofilen und temperaturabhängigen Lastprofilen sowie jährliche Zeitreihen von Außentemperaturen erfolgen. Regenerative Leistungserzeugung durch Windkraftanlagen, Photovoltaik und Solarthermie folgt Wetterbedingungen und Tageszeit. Dahingegen sind Technologien zur Wandlung einer stoffgebundenen Energieart in eine andere (z. B. Power-to-Gas, Power-to-Heat oder Brennstoffzellen) sowie Speichertechnologien zeitlich flexibel einsetzbar. Daher wird im Folgenden die Flexibilität in der Netzplanung thematisiert.

#### E. Flexibilität als Entscheidungskriterium in der Netzplanung

Durch den zukünftig deutlich dynamischeren Verbrauch und die dezentrale Erzeugung von Energie, müssen die Voraussetzungen für die Planung der Energiesysteme geändert werden. Flexibilität wird in Energienetzen eine entscheidende Rolle spielen. Mit Hilfe von Flexibilität lassen sich sowohl in Phasen starker Erzeugung als auch hohen Verbrauchs Lastprofile glätten und so kurzzeitige Netzengpässe vermeiden. Zudem kann die Bereitstellung von Flexibilität die Resilienz im Energiesystem verbessern und so die Versorgungssicherheit erhöhen. Flexibilität lässt sich vor allem durch Kopplungselemente und Speichertechnologien bereitstellen.

In Zukunft sollte Flexibilität in der Planung von Energienetzen berücksichtigt werden. Dadurch können die Kosten und der Zeitaufwand für die Netzausbauplanung reduziert werden. Insbesondere wird auch der Zeitaufwand, in Anbetracht des schnellen Umbruchs im Energiesystem, eine wichtige Entscheidungsgröße darstellen. Außerdem kann der im Absatz IV.B vorgestellte Ansatz zur „Aggregation eines sektorübergreifenden Netzmodells“ um die Berücksichtigung der Flexibilität erweitert werden. Das hat zum Ziel die durch Kopplungselemente und Speichertechnologie bereitgestellte Flexibilität direkt in die Netzoptimierung einfließen zu lassen. Ein wesentlicher Vorteil liegt darin, dass so der Netzausbau direkt mit der Einrichtung von Speichern und Kopplungselementen gegenübergestellt werden kann. Zudem kann auch die Platzierung der Elemente im Netz optimiert werden.

### IV. NETZENTWICKLUNG

Aufbauend aus den Ergebnissen des *Szenario Rahmens* und der *Netzübersetzung* erfolgt im Arbeitsschritt *Netzentwicklung* die eigentliche Betrachtung der Energienetze für Strom, Gas und Wärme. Dazu wird im folgenden Abschnitt ein Programm vorgestellt, welches zur Abschätzung des Status Quo der Netzinfrastuktur ein Stromnetz auf Basis von öffentlichen Daten generiert. Im Anschluss wird eine Methode zur Aggregation in ein Multi-Energie-Netze Modell mittels eines graphentheoretischen Ansatzes vorgestellt.

#### A. Netzmodell aus GIS Daten

Aufgrund fehlender Daten soll im Rahmen des NRL-Projekts ein Stromnetz für die Stadt Hamburg für entsprechende Simulationen generiert werden. Ein erstes Netzdesign konnte mit dem fraunhoferinternen Programm „DaVe“ erstellt werden, wobei „DaVe“ für „(Energie-) Datenanalyse und -Verarbeitung“ steht [24]. Dieses Programm ermöglicht eine automatische und regionsspezifische Generierung von Energienetzmodellen auf

der Basis offener Daten. Derzeit deckt „DaVe“ im Strombereich alle Spannungsebenen für Deutschland und im Gasbereich die Hochdruckebene für Europa ab. Darüber hinaus können die grundlegenden Netzelemente generiert werden, wobei „DaVe“ sich noch in der Entwicklung befindet und ständig erweitert wird.

Zunächst muss ein zuvor ausgewähltes Gebiet an „DaVe“ übergeben werden. Dazu wird ein zufälliges Hamburger Gebiet im Programm „QGis“ markiert [24] (in ABBILDUNG 3 schwarz gepunktet) und als Shape-Datei an „DaVe“ übergeben. Für das markierte Gebiet wird in diesem Projekt ein Niederspannungsnetz in "DaVe" generiert, das in ABBILDUNG 4 zu sehen ist. Für die Erstellung der Netztopologie auf der Niederspannungsebene wurden Methoden entwickelt, um diese aus den gegebenen geografischen Informationen abzuleiten [24].

Zur Bestimmung der Hausanschlussknoten werden die Zentren der Gebäudegrundstücke aus den Open Street Map (OSM) Daten entnommen. Anschließend müssen geeignete Netzanschlusspunkte bestimmt werden. Diese basieren auf der Annahme, dass die Leitungen entlang der Straßen verlaufen. Die Lokation der Netzanschlusspunkte werden mit Hilfe des Python-Pakets „Shapely“ abgeleitet, um die kürzeste Entfernung vom Hausanschlussknoten zur nächstgelegenen Straße zu finden. Ausgehend von den ermittelten Netzknoten werden dann geeignete Leitungen generiert, um die Gebäude miteinander zu verbinden. In einem ersten Schritt werden alle Gebäudeknoten mit den entsprechenden Netzanschlusspunkten verbunden. Im nächsten Schritt werden die Netzanschlussknoten über Leitungen miteinander verbunden, was entlang bestehender Straßenverläufe geschieht. Außerdem werden zusätzliche Knotenpunkte an den Straßenkreuzungen platziert, ohne welche die Abzweigungen im Straßenverlauf nicht verbunden wären.

Für die Transformatoren HöS/HöS, HöS/HS und HS/MS werden die Daten aus OSM bezogen. Die Daten der MS/NS-Transformatoren basieren auf Informationen der *Open Energy Platform* (OEP), wo sie durch die Definition von Lastbereichen und deren Verschneidung mit 360mx360m-Rastern erzeugt werden.



ABBILDUNG 3: AUSGEWÄHLTES HAMBURGER GEBIET IM PROGRAMM „QGIS“.



ABBILDUNG 4: NIEDERSPANNUNGSNETZ FÜR AUSGEWÄHLTES GEBIET AUS ABBILDUNG 3.

Die Stromerzeuger stammen ebenfalls aus der OEP und sind in die beiden Kategorien konventionelle und erneuerbare Energien unterteilt sowie ihrem genauen geografischen Standort zugeordnet. Diese Methode der Netzgenerierung wurde bereits mit Daten von Netzbetreibern, z. B. aus Bamberg, validiert.

### B. Aggregation in ein Multi-Energie-Netze-Modell

Graphentheoretische Ansätze zur Darstellung des Energienetzes ermöglichen die kombinierte Darstellung des Multi-Energie-Netzes durch die Darstellung von Sektorkopplungstechnologien als Eckpunkte. Diese stellen eine Verbindung zwischen mehreren Netzen her, während eine Kante den Energieträger und die Richtung der Kante, die die Eckpunkte verbindet, die Energieflussrichtung darstellt. Wie in ABBILDUNG 5 gezeigt, kann das gesamte Multi-Energie-Netz als ein Graph dargestellt werden.

Neben den bisher angewandten Methoden der Netzberechnung für die einzelnen Sektoren gibt es bereits Ansätze für eine sektorübergreifende Netzberechnung [25] für Quartiersnetze. Hier ist die in [26] beschriebene Methode zu erwähnen, die es erlaubt, gekoppelte Fernwärmesysteme zu berechnen. Die Kopplung der Energienetze wurde hier über eine sektorübergreifende Effizienzmatrix abgebildet. Ein Newton-Raphson-Ansatz löst die nun gekoppelten Lastflussgleichungen für Strom, Wärme und Gas. Allerdings kann man diese Methode nicht auf größere Energiesysteme, wie das Verteilnetz, anwenden, da der Aspekt der Lastschwankungen auf die Netzstruktur hier nicht berücksichtigt wird. In Verteilnetzen muss jedoch die Netzstruktur an einen sich ändernden Verbrauch angepasst werden, um zukünftige Netzengpässe zu vermeiden. In [27] und [28] werden Methoden zur Energieflussberechnung eines Multi-Energie-Systems vorgestellt. Diese Methoden berücksichtigen jedoch nicht den Wasserstoff als Energieträger und Kopplungstechnologie zwischen Strom- und Gasnetz und müssen in dieser Hinsicht erweitert werden. Dies wird in einem graphentheoretischen Modell des Multi-Energie-Netzes zur Durchführung der Lastflussberechnungen angepasst und umgesetzt. In [29] wird der optimale Standort von Ladestationen für Elektrofahrzeuge mit Hilfe der Graphentheorie bestimmt.

Eine weiterentwickelte Variante davon kann in unserem Projekt verwendet werden, um den optimalen Standort von Netzkopplungspunkten wie Elektrolyseanlagen unter Berücksichtigung von Kosten und Netzrestriktionen zu bestimmen.

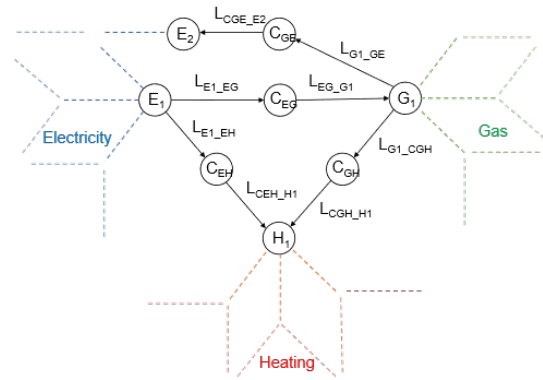


ABBILDUNG 5: DARSTELLUNG EINES GRAPHENTHEORETISCHEN MODELLS FÜR EIN MULTI-ENERGIE-NETZ, ENTNOMMEN AUS [5].

## V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen des vorangegangenen Beitrags ist der Prozess der integrierten Netzplanung über die drei leitungsgebundenen Energieträger Strom, Gas und Wärme beschrieben worden, welcher im vom BMWK geförderten Projekt *iNeP* am Beispiel der Industriemetropole Hamburg entwickelt wird. Dieser beinhaltet zunächst den wichtigen vorangehenden Schritt der Erstellung eines Szenariorahmens. Dieser ist in die Arbeitsschritte der reinen *Bedarfsermittlung* und der *Bedarfsdeckung*, welche das Energiekonzept als Technologiemix zur Deckung der prognostizierten Bedarfe beinhaltet, aufgeteilt. Die Anzahl der Wärmepumpen ist auf Basis nationaler Studien durch bestimmte Indikatoren auf Hamburg regionalisiert worden. Für noch detailliertere regionalisierte Betrachtungen ist die Idee der „neutralen Zonen“ vorgestellt worden. Diese sollen eine geeignete Beschreibung und Charakterisierung von regionalen Gebieten für eine strategische integrierte Netzplanung zulassen. Als Ansätze sind dafür die Zonendefinitionen Stadtteile, äquidistante Raster sowie flexible Zonen und deren Vor- und Nachteile erläutert worden. Der Szenariorahmen stellt die Grundlage für die anschließende Grobplanung der Netzstrukturen dar – dafür muss allerdings in Form einer „Netzübersetzung“ in geeigneter Weise aus Energiebedarfen auf Leistungsgrößen zur Kenntnis der Netzkapazitäten geschlossen werden. Zudem kann die Flexibilität im Deckungskonzept künftig als ein Kriterium in Netzplanungsprozesse einbezogen werden. Mithilfe des Programms „DaVe“ können Stromnetze auf Basis von öffentlichen Daten technisch dargestellt werden und erlauben somit eine Einschätzung über den bisherigen Stand des Hamburger Stromnetzes, ohne auf sensible Daten des Netzbetreibers zugreifen zu müssen. Diese Struktur des Ist-Netzes kann als Ausgangslage für die eigentliche Netzauslegung genutzt werden. Für eine aggregierte, netzübergreifende Betrachtung für energieträgerübergreifende Netzberechnungen ist zudem ein graphentheoretischer Ansatz vorgestellt worden.

Als weitergehende Arbeit ist insbesondere die Ausarbeitung eines Konzeptes für die logische und technische Ausführung der Schnittstellen zwischen den vorangegangenen einzelnen Methodikschritten zu nennen. Dazu werden einzelne Schritte noch feiner ausgearbeitet und die Ergebnisse aufeinander abgestimmt.

## VI. DANKSAGUNG

Vielen Dank an die im Projekt beteiligten Industriepartner Gasnetz Hamburg GmbH, Hamburger Energiewerke und Stromnetz Hamburg GmbH für die angeregten Diskussionen und die Unterstützung bei der Entwicklung dieses Beitrags

Das Teilvorhaben „Integrierte Netzplanung für die drei Energieträger Strom, Gas und Wärme“ ist Teil des Norddeutschen Reallabors mit den FKZ 03EWR007H2, 03EWR007O2 und 03EWR007N2 der Hochschulpartner.

## LITERATUR

- [1] „Hamburger Klimaplan: Höhere CO<sub>2</sub> Minderungsziele,“ [Online]. Available: <https://www.hamburg.de/klimaplan/13254898/hoehere-co2-minderungsziele/>. [Zugriff am 23. September 2022].
- [2] O. H. Koch und B. Pfarrherr, „Integrierte Planung und Kopplung von Netzen als Basis für die Zielerreichung im Klimaschutz,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz*, Bd. 1, pp. 13-15, 2019.
- [3] S. Micheely, „Integrierte Netzplanung der Hamburger Energienetze,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz*, Bd. 2, pp. 119-121, 2020.
- [4] D. Vorwerk, D. Schulz, S. Micheely, O. H. Koch, C. Cosler, J. Heise, M. Mostafa, A. Povel und C. Töbermann, „iNeP – integrierte Netzentwicklungsplanung für die Energieträger Strom, Gas und Wärme,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz*, Bd. 3, pp. 47-56, 2021.
- [5] M. Mostafa, D. Vorwerk, J. Heise, A. Povel, N. Sanina, D. Babazadeh, C. Töbermann, C. Becker, A. Speerforck und D. Schulz, „Integrated Planning of Multi-energy Grids Concepts and Challenges (angenommen),“ in *NEIS 2022 - Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems*, Hamburg, 2022.
- [6] H. Nagel und R. R. Cichowski (Hrsg.), *Systematische Netzplanung, Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze*, 2. Auflage, Berlin, Frankfurt a. M.: VDE Verlag GmbH, VDEW Energieverlag GmbH, 2008.
- [7] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, *Genehmigung des Szenariorahmens 2023-2037/2045*, Bonn, 2022.
- [8] dena Deutsche Energie-Agentur, „Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor,“ Oktober 2017. [Online]. Available: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/szenarien-fuer-eine-marktwirtschaftliche-klima-und-ressourcenschutzpolitik-2050-im-gebaudesektor/>. [Zugriff am 18. September 2022].
- [9] dena Deutsche Energie-Agentur, „Abschlussbericht dena Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität; Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe,“ Oktober 2021. [Online]. Available: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht\\_dena-Leitstudie\\_Aufbruch\\_Klimaneutralitaet.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf).
- [10] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, „Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen Update November 2021: Klimaneutralität 2045,“ November 2021. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>. [Zugriff am 18. September 2022].
- [11] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, „Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045 Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber,“ Januar 2022. [Online]. Available: [https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf\\_NEP2037\\_2023.pdf](https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf_NEP2037_2023.pdf). [Zugriff am 18. September 2022].
- [12] DESTATIS, „Bevölkerung nach Nationalität und Bundesländern,“ [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/bevoelkerung-nichtdeutsch-laender.html>. [Zugriff am 16. September 2022].
- [13] DESTATIS, „Haushalte nach Haushaltsgröße und Haushaltsmitgliedern,“ [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Tabellen/1-2-privathaushalte-bundeslaender.html;jsessionid=992D603B53B6539F94652443295AC367.live722>. [Zugriff am 16. September 2022].
- [14] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Gemeinsames Statistikportal, „Einkommensverteilung,“ [Online]. Available: <https://www.statistikportal.de/de/vgrdl/ergebnisse-laenderebene/einkommen/ek#9564>. [Zugriff am 16. September 2022].
- [15] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Wie heizt das Land Hamburg?,“ 2019. [Online]. Available: [https://www.bdew.de/media/documents/BDEW\\_Heizungsmarkt\\_Regionalbericht\\_Hamburg.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Heizungsmarkt_Regionalbericht_Hamburg.pdf). [Zugriff am 18. September 2022].
- [16] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, „Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität,“ 2020.
- [17] „Geo-Online Hamburg,“ [Online]. Available: <https://geoportal-hamburg.de/geo-online/>. [Zugriff am 18. September 2022].
- [18] „Transparenzportal Hamburg,“ [Online]. Available: <https://transparenz.hamburg.de/>. [Zugriff am 18. September 2022].
- [19] H. Kosow und R. Gaßner, „Methods of Future and Scenario Analysis: Overview, Assessment, and Selection Criteria,“ Bonn, 2008.
- [20] Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, „Hamburger Stadtteil-Profil: Städtestatistik für Hamburg,“ [Online]. Available: <https://www.statistik-nord.de/zahlen-fakten/regionalstatistik-datenbanken-und-karten/hamburger-stadtteil-profil-staedtestatistik-fuer-hamburg>. [Zugriff am 18. September 2022].
- [21] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, *Elektrische Energieversorgung, Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*, 9. aktualisierte und korrigierte Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [22] G. Cerbe, B. Lendt, K. Brüggemann, M. Dehli, F. Gröschl, K. Heikrodt, T. Kleiber, J. Kuck, J. Mischner, T. Schmidt, A. Seemann und W. Thielen, *Grundlagen der Gastechnik*, 8., vollständig überarbeitete Auflage, München: Carl Hanser Verlag München, 2017.
- [23] P. Konstantin, *Praxisbuch der Fernwärmeversorgung; Systeme, Netzaufbauvarianten, Kraft-Wärme-Kopplung, Kostenstrukturen und Preisbildung*, Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [24] T. Banze, „DaVe - Ein Softwaretool zur automatisierten Generierung von regionalspezifischen Stromnetzen, basierend auf Open Data,“ in *Jahrestreffen des Forschungsnetzwerk Energiesystemanalyse 2021*, 2020.
- [25] K. Hoth, T. Steffen, B. Wiegel, A. Youssfi, D. Babazadeh, M. Venzke, C. Becker, K. Fischer und V. Turau, „Holistic Simulation Approach for Optimal Operation of Smart,“ *Infrastructures*, 23 Oktober 2021.
- [26] X. Liu und P. Mancarella, „Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems,“ *Applied Energy*, pp. 336-352, April 2016.
- [27] G. Zhang, F. Zhang, K. Meng, X. Zhang und Z. Yang Dong, „A Fixed-point Based Distributed Method for Energy,“ *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Bd. Issue 4, pp. 2567-2580, Oktober 2020.
- [28] X. Tian, L. Zhouhong, P. Zhaoguang und S. Hongbin, „Modeling and Simulation for Multi Energy Flow Coupled Network Computing,“ *POWERCON*, pp. 992-998, November 2018.
- [29] P. Goyal, P. Chhura, V. Khandelwal und S. Agrawal, „2020 Research, Innovation, Knowledge Management and Technology Application for Business Sustainability (INBUSH),“ in *Determining the Adoption Index of Electric Vehicles Using Graph Theory Matrix Approach*, Greater Noida, India, 2020.