iNeP – integrierte Netzentwicklungsplanung für die Energieträger Strom, Gas und Wärme

Daniela Vorwerk*‡ und Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
*daniela.vorwerk@hsu-hh.de
‡ Diese Autor:innen haben in gleichem Maße an dem Beitrag mitgewirkt.

Stefan Micheely‡
Digitalisierung & Netz
Stromnetz Hamburg GmbH
Hamburg, Deutschland

Johannes Heise und Marwan Mostafa
Elektrische Energietechnik
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

Oliver Henry Koch
Wasserstoff
Gasnetz Hamburg GmbH
Hamburg, Deutschland

Alexander Povel
Technische Thermodynamik
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

Christoph Cosler
Strategie und Unternehmensentwicklung
Wärme Hamburg GmbH
Hamburg, Deutschland

Christian Töbermann
Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
Technische Hochschule Lübeck
Lübeck, Deutschland

***Kurzfassung* – Das Vorhaben „iNeP – integrierte Netzentwicklungsplanung für die Energieträger Strom, Gas und Wärme“ als Teil des Gesamtvorhabens „Norddeutsches Reallabor“ adressiert die integrierte, das bedeutet gemeinsame Netzentwicklungsplanung für die drei leitungsgebundenen Energieträger Strom, Gas und Wärme in der Metropolregion Hamburg. Beteiligt sind dabei neben den drei städtischen Hamburger Verteilnetzbetreibern norddeutsche Einrichtungen aus Forschung und Entwicklung. Das Projekt beinhaltet den vollständigen Netzplanungsprozess, von der Szenarienentwicklung über die rechnergestützte Netzplanung bis hin zur Erstellung einer über die Energiesparten abgestimmten Roadmap. Der in der ersten Phase aufzustellende Szenariorahmen soll dabei nicht nur für die beteiligten Netzbetreiber gelten, sondern auch allgemein als Planungsgrundlage akzeptiert werden können. Er muss nicht nur den Anforderungen der im zweiten Schritt durchzuführenden Netzberechnung genügen, sondern darüber hinaus auch die Kommunikationsfähigkeit sowohl zwischen den drei Netzbetreibern als auch mit externen Interessensträgern ermöglichen. Erst auf dieser Basis werden mit den Werkzeugen für die Netzberechnung technische Lösungen erstellt, die im Zusammenspiel aller drei beteiligten Netzbetreiber funktionieren. Eine Zusammenfassung themenverwandter Studien und in Deutschland geförderter Forschungsprojekte zeigt die Diversität und Vielschichtigkeit des Themenkomplexes multi-modaler Energienetze.**

Stichworte – Sektorenkopplung, multi-modale Energienetze, Netzplanung, Energieszenarien

NOMENKLATUR

BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundeministerium für Wirtschaft und Energie
EE	Erneuerbare Energien
GNH	Gasnetz Hamburg GmbH
HSU	Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
iNeP	Integrierte Netzentwicklungsplanung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NEP	Netzentwicklungsplan
NRL	Norddeutsches Reallabor
PV	Photovoltaik
SNH	Stromnetz Hamburg GmbH
THL	Technische Hochschule Lübeck
TUHH	Technische Universität Hamburg
WH	Wärme Hamburg GmbH

I. EINLEITUNG

Eine spezifische Aufgabe und Ziel der Integrierten Netzplanung (*iNeP*) ist die Erstellung einer koordinierten Roadmap für die Transformation der Energienetze einschließlich der an sie zu koppelnden Sektorkopplungsanlagen in Hamburg, um das Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 in allen Energienutzungssektoren zu erreichen. Nur durch eine über die Energiesparten übergreifende Netzplanung wird es gelingen, die Endenergiebedarfe der verschiedenen Sektoren Industrie, Haushalt, Wärme und Mobilität in der jeweils klimaschonendsten Energieform decken zu können. Somit ist eine integrierte Netzplanung ein entscheidender Faktor zur Erreichung der Klimaziele [1].

DOI: 10.24405/13948

In dem Beitrag [2] aus 2019 in der Schriftenreihe „Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz“ wurde bereits in der Phase der Konzeption zum Projekt *iNeP* der drei Hamburger Energienetzbetreiber Gasnetz Hamburg (GNH), Stromnetz Hamburg (SNH) und Wärme Hamburg (WH) (zusammen: Industrie-Partner im *iNeP*-Konsortium) ausgeführt, dass der inzwischen „relativ hohe Anteil erneuerbarer Energie“ im Stromnetz nicht ausreiche, um die Klimaschutzziele erreichen zu können [2]. Dazu ist in allen Sektoren (Industrie, Gewerbe, Verkehr und Haushalte) ausschließlich CO_2-freie Energie einzusetzen, und die Nutzer sind auch nur durch Einbeziehung aller Netzarten zu erreichen. Darüber hinaus sind u. U. durch „die Kopplung der beteiligten Infrastrukturen Netzengpässe“ und Risiken der Versorgungssicherheit technisch und wirtschaftlich sinnvoll zu vermeiden. Zur Zielerreichung, insbesondere in Bezug auf die Methodenentwicklung und den Überblick über den Stand von Wissenschaft und Technik, sind die Hochschulinstitute der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU), der Technischen Universität Hamburg (TUHH) und der Technischen Hochschule Lübeck (THL) als FuE-Partner im *iNeP*-Konsortium tätig.

Zudem ist in [3] im Jahre 2020 nach Bewerbung der Förderpartner um Fördermittel des Bundeswirtschafts-ministeriums (BMWi) und Einbettung des Projekts in das Gesamtvorhaben des Norddeutschen Reallabors (NRL) *iNeP* als „Werkzeug für Energiewende“ bezeichnet worden. „Die speziellen Herausforderungen“ liegen dabei sowohl in „der Komplexität der Aufgabe“ als auch in der „Validität externer Daten und [der] Einbindung externer Stakeholder“ [3]. Die Beiträge [4] und [5] im Band „Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz“ von 2020 nehmen Bezug auf die künftige Rolle des Gasnetzes in der Energiewende, in [6] wird neben der technischen Beschreibung der Netzstrukturen und der Entstehungsgeschichte auch die regenerative Zukunft für Wärmenetze thematisiert. Einzelne technologische Bausteine der realen Komponenten für integrierte Netze wurden dort insbesondere durch die Beiträge der HSU beschrieben und vorgestellt.

Im Rahmen dieses Beitrags wird zunächst das Projekt *iNeP* anhand seiner Zielstellungen und Arbeitsplanung in Form der ausgearbeiteten Arbeitsmodule vorgestellt. Darauffolgend wird auf bestehende Herausforderungen der beteiligten Netzbetreiber SNH, WH und GNH im Zuge der durch die Energiewende getriebenen notwendigen Netz-transformationen eingegangen. Es werden die Anforderungen der Hamburger Netzbetreiber sowie die sich aus *iNeP* erhofften Vorteile durch die Verwertung von Methodik und Ergebnissen für die operativen Netzplanungsprozesse adressiert. Abschließend wird in einer Zusammenfassung der Literatur ein Überblick über relevante Studien sowie aktuelle Forschungsprojekte im Bereich multi-modaler Energienetze in der Bundesrepublik Deutschland gegeben.

II. iNeP – Integrierte Netzentwicklungsplanung der Energieträger Strom, Gas und Wärme

Ziel des Vorhabens *iNeP* ist die Entwicklung einer Methodik für den Netzausbau für die drei Energieträger Strom, Gas und Wärme in einer integrierten, d. h. gemeinsamen, Weise. Herausforderungen dabei sind sowohl die verschiedenen physikalischen und technischen Randbedingungen der Energieträger als auch die geographischen und strukturellen Randbedingungen [1].

Die integrierte Netzplanung beinhaltet im Wesentlichen drei zentrale, aufeinander aufbauende Bearbeitungsschritte, welche in Abbildung 1 ersichtlich sind. In einem ersten Schritt müssen künftig zu erwartende Endenergiebedarfe innerhalb eines gewählten *Szenariorahmens* sinnvoll abgeschätzt werden. Dazu werden reale Endenergiebedarfe sowie zukünftige Lastprognosen und Infrastrukturdaten erhoben. Dabei ist vorgesehen, bestimmte Regionen sinnvoll in bestimmte Strukturen, sogenannte *Zonen*, mit vergleichbarer Bedarfsstruktur einzuteilen [1]. Im Rahmen der *rechnergestützten Netzplanung* sollen auf Basis der im Szenariorahmen prognostizierten Entwicklungen verschiedene Netzausbauvarianten zur Deckung der Bedarfe identifiziert und miteinander verglichen werden können. Schließlich soll eine *Roadmap* als Leitlinie zur zeitlichen Einordnung für geeignete Ausbaumaßnahmen entwickelt werden [1].



Abbildung 1: Integrierte Netzplanung - aufeinander aufbauende Schritte für die Bearbeitung, entnommen aus [1].

Zur Erreichung des Ziels der Klimaneutralität in der Industriemetropole Hamburg bedarf es insbesondere der Berücksichtigung verschiedener Transformationspfade für die Energiebereitstellung. Zur Wandlung von Energieträgern bestehen zahlreiche Technologien, die entweder als Endenergiegeräte (z. B. Brennstoffzellenheizungen oder Wärmepumpen) oder als Kopplungstechnologien zwischen den Netzen (Großelektrolyseure, BHKW…) ausgeführt werden können. Innerhalb des Teilvorhabens sind daher zahlreiche Parameter zu berücksichtigen [1]. Ein Überblick über einige dieser Parameter ist in Abbildung 2 gegeben.

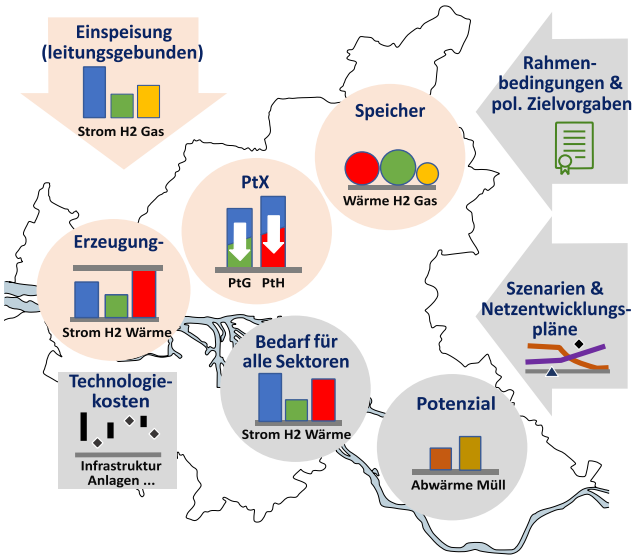


Abbildung 2: Überblick einiger relevanter Parameter, entnommen aus [1].

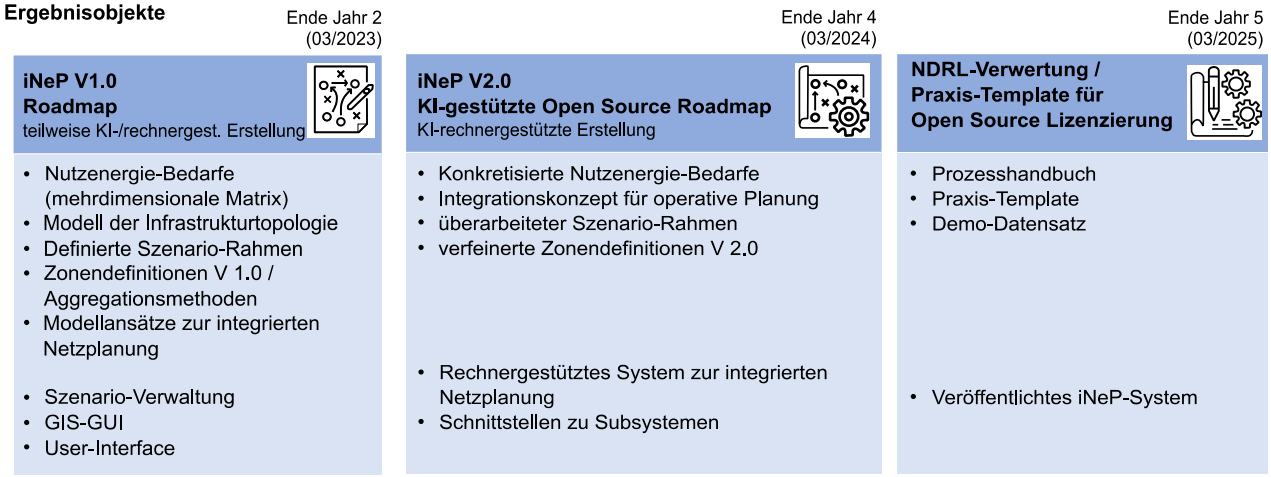


ABBILDUNG 3: INTEGRIERTE NETZPLANUNG - ÜBERBLICK DER PROJEKTPHASEN MIT ZIEL-ERGEBNISOBJEKTEN PRO PHASE, ENTNOMMEN AUS [1].

Die insgesamt fünf Jahre der Projektlaufzeit sind wiederum in einzelne Phasen des Vorhabens gegliedert, die jeweils mit der Erreichung von bestimmten Ergebnisobjekten abgeschlossen werden sollen [1]. In ABBILDUNG 3 sind diese drei zeitlichen Projektphasen mit den maßgeblich geplanten Ergebnisobjekten aufgeführt.

Die erste Projektphase, *iNeP 1.0*, beinhaltet die erste Erfassung an Endergiebedarfen, die Modellentwicklung von Infrastrukturtopologien, einen definierten Szenariorahmen und erste Ansätze zur Moellaggregation und Zonenentwicklung (*Zonen 1.0*). Die Beendigung dieser Projektphase ist zum Ende des zweiten Jahres geplant. Als Ergebnisobjekte sind ein erster Roadmap-Entwurf mit grober Richtungsweisung, ein erstes Geoinformationssystem-Graphical User Interface (*GIS-GUI*) sowie eine funktionsfähige Szenarioverwaltung vorgesehen. Die zweite Projektphase, *iNeP 2.0*, soll die Erarbeitung bereits konkreterer Nutzenergiebedarfe, sowie detaillierterer Versionen des Szenariorahmens und der Zonendefinition (*Zonen 2.0*) enthalten. Abgeschlossen werden soll diese Projektphase nach dem vierten Jahr mit einem rechnergestützten Tool zur integrierten Netzplanung. Zum Ende der gesamten Projektlaufzeit ist die Verwertung des hier entwickelten Tools als veröffentlichtes System mit Prozesshandbuch und Praxis-Template vorgesehen [1].

A. Arbeitsplanung

Im Rahmen des Arbeitsplans gliedert sich das Vorhaben *iNeP* in insgesamt zehn Arbeitsmodule. Diese dienen einerseits dazu, die in ABBILDUNG 1 gezeigten, maßgeblichen Prozessschritte der integrierten Netzplanung in weitere, kleine Arbeitsfelder einzuteilen, andererseits sind in der Arbeitsplanung auch projektbegleitend unterstützende Module wie *Evaluation und Optimierung* und *Wissensaustausch* berücksichtigt. Die inhaltlichen Bestandteile der zehn Arbeitsmodule werden im Folgenden kurz erläutert.

1) Datenerhebung/Szenariorahmen

Durch Analyse von Studien, sowie der Zuhilfenahme aktueller Bedarfsdaten sollen schlüssige, regionalisierte Prognosen für zukünftig zu erwartende Endenergiebedarfe in der Industriemetropole Hamburg erstellt werden. Zentral hierbei ist insbesondere die zukünftige Entwicklung von Raumwärmebedarfen. Darüber hinaus muss zur Deckung der zu erwartenden Endenergiebedarfe ein geeignetes Bedarfsdeckungskonzept entwickelt werden. Auch die Entwicklung und Durchdringung verschiedener Technologien, wie z. B. der Zuwachs an Elektromobilität, Wärmepumpen, Brennstoffzellenheizungen etc. muss hier berücksichtigt und sinnvoll quantifiziert werden. Eine sachlogische Verknüpfung der hier erarbeiteten Daten für Struktur- und Technologieparameter sowie schlüssiger Annahmen für Entwicklungstrends derer, stellt die Grundlage für einen geeigneten „Szenarienkorridor“ dar, der den Rahmen für den eigentlichen Netzplanungsprozess bildet [1].

2) User Interfaces und Visualisierung

Im Arbeitsfeld *User Interface und Visualisierung* wird die Entwicklung einer GIS-GUI thematisiert. Diese verfolgt das wesentliche Ziel, zukünftig prognostizierte Endenergiebedarfe sowie die daraus abgeleiteten Netzausbauvarianten übersichtlich aufzuzeigen. Im Rahmen einer zu entwickelnden Szenario-Verwaltung soll die Eingabe und Parametrierung von Daten für verschiedene Anwender ermöglicht werden und daraus eine georeferenzierte Darstellung der erhobenen Endenergiebedarfe, Netzstrukturen, *Zonen* und den ermittelten Planungsergebnissen generiert werden. Zunächst sind dazu die wesentlichen Anforderungen an Benutzeroberfläche und Visualisierung für die unterschiedlichen Zielgruppen an Nutzern zu identifizieren. Das User-Interface soll im Laufe der Projektbearbeitung stetig um Funktionalitäten erweitert und weiterentwickelt werden [1].

3) Daten-Analyse und Aufbereitung

Das Arbeitsfeld *Daten-Analyse und Aufbereitung* umfasst den Umgang mit den für *iNeP* relevanten Datensätzen. Dazu zählen einerseits die im Wesentlichen für den Szenariorahmen aus Arbeitsmodul 1) entscheidenden Datensätze wie aktuelle Technologieparamater, regionale Strukturparameter, aktuelle und prognostizierte Verbrauchsdaten und die jeweils dafür zu erwartenden Trends, andererseits auch Infrastrukturdaten der bestehenden Netze für Strom, Gas und Fern-/ bzw. Nahwärme in Hamburg. Zunächst müssen dazu geeignete Formate für den Umgang mit den zahlreichen, diversen Datensätzen identifiziert und jeweils geeignete Schnittstellen geschaffen werden. Ein gleiches Aggregationslevel sowie auch regionale Bezüge der Datensätze bilden den Grundstein zur Entwicklung von *Zonen* [1].

4) Methodikentwicklung zur sektorübergreifenden Netzberechnung

Die Netzberechnung dient als Bestandteil der Netzplanung zur Überprüfung der Übertragungsfähigkeit bestehender Strukturen und als Anhaltspunkt für die Notwendigkeit von Maßnahmen zur Netzverstärkung [7]. Netze müssen dabei immer für den ungünstigsten Belastungsfall, d. h. die Höchstlast, ausgelegt sein. In *iNeP* soll dazu eine vereinfachte, sektorübergreifende Netzberechnung in Form eines funktionsfähigen Softwaretools entstehen. Diese Art der Berechnung ersetzt zwar nicht die in den Häusern zur Netzplanung angewandten Netzberechnungstools, soll allerdings schon vor den separaten Berechnungen erste Erkenntnisse für zulässige Lastflüsse in den Netzstrukturen generieren. Dabei ist zu untersuchen, in welcher Form eine sektorübergreifende Netzberechnung für die bestehenden Netzstrukturen mit Berücksichtigung der verschiedenen Transformationspfade und Kopplungstechnologien durchgeführt werden kann [1].

5) Modellaggregation

Eine Modellaggregation hat den Zweck, rechnergestützte Modelle gegenüber dem abzubildenden realen System zwecks Verringerung der Rechenzeit und des Modellierungsaufwand zu reduzieren. Im Vorhaben *iNeP* beinhaltet die Modellaggregation einerseits die geeignete, aggregierte Darstellung der Netze für die Berechnung andererseits sollen hier die stark heterogenen Verbrauchsstrukturen in Hamburg in Form von *Zonen* aggregiert werden [1].

6) Entwicklung von Verfahren zur rechnergestützten Netzentwicklungsplanung

Für den in Arbeitsmodul 1) erarbeiteten Szenariorahmen sollen im Rahmen der rechnergestützten Netzentwicklungsplanung verschiedene Ausbauvarianten bestimmt und anhand abgestimmter Kriterien miteinander verglichen werden können. Dazu werden separate Netzplanungsverfahren für die drei Energiesektoren Strom, Gas und Wärme miteinander zu einem integrierten Ansatz weiterentwickelt. Zur Bewertung der Planungsvarianten müssen bestimmte Zielparameter (s. Arbeitsmodul 7)) mit in die Betrachtung einbezogen werden. Diese könnten z. B. Minimierung der Investitionskosten, des öffentlichen Flächenbedarfs oder zahlreiche weitere sein. Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Zielgrößen sind auch multikriterielle Ansätze mittels Gewichtung einzelner Zielgrößen denkbar. Die mathematische Erfassung und softwaretechnische Umsetzung dieser Zielparameter sowie bestehender Randbedingungen in Form von Zielfunktionen für die integrierte Netzplanung und die Generierung dazu technisch möglicher Ausbauvarianten sind Bestandteil dieses Arbeitsmoduls [1].

6a) Entwicklung von KI-Verfahren für integrierte und sektorübergreifende Netzplanung

Im Arbeitsmodul 6a) mit der zentralen Bearbeitung durch die THL sollen sektorübergreifende Netzplanungsverfahren auf Grundlage von Methodiken der Künstlichen Intelligenz (KI) erarbeitet werden, welche allgemein auf städtische Netzstrukturen anwendbar sein sollen. Diese Methodiken sollen zur Unterstützung des Moduls 6) in datenintensiven Teilproblemstellungen dienen [1].

7) Erstellung Roadmap

Im Rahmen des Arbeitsmoduls 7) sollen abgestimmte Zielkriterien für die integrierte Netzplanung definiert werden. Im Zuge dessen sind bestehende Rahmenbedingungen wie Klimaverträglichkeit, gesellschaftliche Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen. Eine erste Version der Roadmap in *iNeP 1.0* soll Inhalte zu wesentlichen Richtungsentscheidungen hinsichtlich des Netzausbaus aufzeigen. In der zweiten Projektphase sollen dann angesichts zentraler Bewertungskriterien durch Anwendung der rechnergestützten Netzentwicklungsplanung (s. Arbeitsmodul 6)) konkretere Antworten zu Netzentwicklungsvarianten gegeben werden können. Auf Basis von vielfältigen Optionsbetrachtungen und deren Evaluation kann in *iNeP 2.0* eine aktualisierte Roadmap erstellt werden. Diese wird dann einem Abstimmungs- und Koordinationsprozess zwischen den Netzbetreibern zugeführt. Eine gemeinsam konsolidierte Roadmap soll als Bestandteil in die Visualisierung aus Arbeitsmodul 2) einbezogen werden [1].

8) Integration in die operativen Netzplanungen

Die in den Aktivitäten von *iNeP* erarbeiteten Ergebnisse sollen langfristig in die operativen Planungsprozesse der jeweils beteiligten Netzbetreiber für Strom-, Gas- und Wärmenetze in Hamburg eingebunden werden. Dafür müssen die in der Roadmap festgehaltenen Erkenntnisse für die jeweiligen nachgelagerten Planungsschritte der Netzbetreiber in geeigneter Form aufbereitet und exportiert werden. Innerhalb der einzelnen Häuser werden die Anforderungen noch einmal auf technische und kommerzielle Machbarkeit überprüft. Wesentliche Erkenntnisse dort können auch noch einmal in die rechnergestützte Netzplanung von *iNeP* zurückgegeben und dort als Randbedingungen berücksichtigt werden [1].

9) Evaluation und Optimierung

Durch das Arbeitsmodul *Evaluation und Optimierung* soll die gegenseitige Evaluation verschiedener Arbeitsprozesse und Aktivitäten erfolgen. Dazu sollen ab der zweiten Projektphase die aus der ersten Phase erwirkten Ergebnisse kontinuierlich analysiert werden. Durch diese Kontrollschleife sollen Schwachstellen sowohl in der Datengrundlage als auch in Methodik und Algorithmen frühzeitig identifiziert und Konzepte zur Verbesserung und Beseitigung dieser Schwachstellen erarbeitet werden. Dadurch wird eine enge Zusammenarbeit zwischen Netzbetreibern, FuE-Partnern und externen Dienstleistern gefördert, die die bestmögliche Ausarbeitung des Tools ermöglicht [1].

10) Wissensaustausch und begleitender Forschungstransfer

Das Arbeitsmodul Wissensaustausch umfasst die relevanten Bereiche zur Kommunikation und Außendarstellung des Vorhabens. Zum einen umfasst dies den Kontakt mit anderen Arbeitsgruppen und Teilvorhaben innerhalb des Verbundprojektes NRL, zum anderen ist der Austausch mit anderen BMWi-Reallaboren sowie weiteren Forschungsprojekten, die sich mit ähnlichen Thematiken auseinandersetzen, Bestandteil dieses Arbeitsmoduls. Darüber hinaus ist auch die enge Zusammenarbeit mit den Fachverbänden vorgesehen. Durch die Kommunikation mit anderen Teilvorhaben innerhalb und außerhalb des Verbundvorhabens soll einerseits redundanter Arbeit vorgebeugt und andererseits eine klare Abgrenzung für methodische Alleinstellungsmerkmale erwirkt werden. Die Koordination von Veröffentlichungen und Vorstellungen der im Projekt erreichten Forschungsleistungen und Ergebnisse sind ebenfalls Inhalt dieses Arbeitsfelds [1].

III. Wesentliche Herausforderungen und Anforderungen an iNeP

Wie bereits in den vorstehenden Kapiteln erläutert, ist es das Ziel des Projektes *iNeP*, eine koordinierte und akzeptierte Roadmap zur Transformation der Energienetze für Strom, Gase und Wärme zu entwickeln, um dadurch die Grundlage für eine erfolgreiche Dekarbonisierung aller Sektoren in einer Industriemetropole zu schaffen. Durch eine Analyse verschiedener Planungsszenarien soll eine optimale Energieinfrastruktur hinsichtlich der Erreichung von politisch vorgegebenen Klimazielen unter Berücksichtigung des Aufwands und weiterer definierter Kriterien konzipiert werden. Im Rahmen von *iNeP* wird eine Planungsmethodik entworfen, die neben den Netzen die Erzeugungs-, sowie netzorientierte Speicher- und Kopplungskapazitäten mit dem Fokus auf die Entwicklung des Energiebedarfs berücksichtigt. Die zu konzipierende Roadmap soll, z. B. als Entscheidungshilfe, in den Diskussionen mit möglichst vielen Stakeholdern einsetzbar sein sowie die konkrete Planung technischer Maßnahmen unterstützen.

Durch die gemeinsame grundsätzliche Planung aller drei Netzarten der beteiligten Netzbetreiber über einen langfristigen Zeitraum und über die angebotenen Energieformen ergeben sich voraussichtlich Vorteile für einen abgestimmten Szenariorahmen und in der Bewertung technischer Lösungen. Zunächst ist ein Szenariorahmen zu entwickeln und aufzustellen, der nicht nur für die beteiligten Netzbetreiber gilt, sondern auch allgemein als Planungsgrundlage akzeptiert wird. Auf dieser Basis werden mit den Werkzeugen für Netzberechnung technische Lösungen erstellt, die im Zusammenspiel aller drei beteiligten Netzbetreiber funktionieren. Die Bewertung technischer und wirtschaftlicher Aspekte gemeinsam erarbeiteter Lösungspfade verbessert die Entscheidungsfindung gegenüber nachgelagerten Diskussionen über Einzeloptimierung der beteiligten Unternehmen.

Aufgrund der sich dynamisch ändernden Randbedingungen (u. a. politische Vorgaben, Regulierungsrahmen, kundenseitige Anpassungen in Geschäftsprozesse und damit für die Netzbetreiber Entwicklungen im Energiebedarf und -dargebot) bleibt das per Roadmap definierte Zielsystem im Zeitraum bis zur vollständigen Umsetzung der Energiewende voraussichtlich nicht konstant. Daher soll über die Methodik von *iNeP* ein iterativer Prozess etabliert werden, der diese Entwicklungen über erforderliche Anpassungen der Eingangsparameter nachsteuern kann.

A. Herausforderungen zur Aufstellung eines abgestimmten Szenariorahmens

In der ersten Phase nach Projektbeginn im April 2021 erscheint es zunächst sinnvoll, die Anforderungen aus der Netzplanung an die Ergebnisse von Versorgungsprognosen zu beschreiben, die ein zukünftig integriertes Netzplanungs-Werkzeug liefern sollte. Mit *iNeP* soll eine deutliche Verbesserung der Planungsqualität erreicht werden, weil zum Ersten die Anforderungen an alle drei betrachteten Netzsparten betrachtet werden und zum Zweiten sich diese Anforderungen durch die Umsetzung der Energiewende bei den Netzkunden ändern werden.

1) Künftige Herausforderungen für das Hamburger Stromverteilnetz

Im vorherigen Band „Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz“ von 2020 wurde in [8], [9] und [10] bereits beschrieben, wie das Hamburger Stromnetz grundsätzlich aufgebaut ist und welche externen Einflüsse und Anforderungen zu berücksichtigen sind. In einem zweiten Beitrag wird detaillierter das Vorgehen bei der Optimierungsaufgabe „Zielnetzplanung“ erläutert sowie in einem dritten Beitrag die Methodik zur nachhaltigen Bewirtschaftung die Assetmanagement-Methodik vorgestellt.

Aus Sicht des Stromnetzes sind in Hamburg „vorrangig […] die Themen Elektromobilität und Power-to-Heat-Anwendungen wie Strom-Wärmepumpen zu nennen. Aber auch im klassischen Bereich der Stromanwendungen im Haushalts-, Gewerbe- und vor allem Industriekundenbereich können Veränderungen auftreten, die deutlichen Einfluss auf die zukünftige Dimensionierung der Stromverteilnetze haben.“ [11]. Für die übergeordnete Planung auf der Ebene der Übertragungsnetze existiere demnach mit den Netzentwicklungsplänen (NEP) ein Instrument, mit dem der bedarfsgerechte Aus- und Umbau in dieser Ebene mit dem Ziel, einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb zu gewährleisten, erreicht wird. Eine Verwertung mit einer hohen räumlichen Auflösung und einer Hamburg-spezifischen Detaillierung fehle bisher [11] und wird in dem im Artikel beschrieben Projekt auch nur für die Hochspannungsebene 110-kV verfolgt.

Daher steht für die Stromnetzbetreiberin SNH vor allem ein Prognosewerkzeug im Mittelpunkt des Interesses, das verwertbare Informationen insbesondere für die Planung der Mittel- und Niederspannungsnetze (bei SNH: 10 kV und 0,4 kV) liefert. Schon durch die Anzahl der Netzkunden in diesen Ebenen kann keine individuelle Planung aufgesetzt werden. In der Ebene des Hochspannungsnetzes wäre die sowohl über die Anzahl der Netzkunden als auch eine über die Standardprozesse hinausgehende Kommunikation innerhalb des Verbundprojekts NRL die Erfassung und Umsetzung von Planungsparametern auch ohne ein neu zu konstruierendes Werkzeug möglich.

Die Überplanung der diversen Netze der angesprochenen 10- und 0,4-kV-Ebenen benötigt aufgrund der Komplexität innerhalb der Industriemetropole Hamburg bei gleichzeitig fortlaufenden Anschluss-, Ersatz- und Erneuerungstätigkeiten mit den Bearbeitungskapazitäten des Kerngeschäfts mehrere Jahre Vorlauf. Für die neu hinzukommenden Aufgaben sind über den bisher vorhandenen Stand hinaus Prognosen über die zu betrachtenden Langfristzeiträume erforderlich, die wesentlich detailliertere Aussagen hinsichtlich der geografischen Verteilung und der Größe des Bedarfs an Netzkapazität (im logistischen Sinne) für Lasten und Einspeisungen heutiger und potentiell neuer Netzkunden beinhalten müssen, als sie heute in den Prognosewerkzeugen zur Verfügung stehen.

2) Künftige Herausforderungen für Wärme Hamburg

Grundsätzlich sind für die Planung von Fernwärmenetzen bzw. -verbundsystemen die spezifischen Wärmebedarfe der zu versorgenden Einheiten und die kundentypen-spezifischen Lastgänge die wesentlichen Einflussgrößen. Durch Einflüsse von außen (Wetter- und Klimaeinflüsse) sowie die Veränderung der gebäudetechnischen Gegebenheiten (z. B. energetische Sanierung) und bedingt auch durch optimiertes bzw. gesteuertes Heizverhalten (z. B. Smart Thermostat) kann unterstellt werden, dass sich der Wärmebedarf sowohl in Energiemenge als auch Leistungshöhe über die Zeit verändert und ist daher entsprechend zu prognostizieren. Aus Sicht der WH müssen sich anhand der Wärmebedarfsprognosen

potenzielle Wachstumsgebiete für eine leitungsgebundene Wärmeversorgung herauskristallisieren.

Im Fernwärmeverbundsystem wird mit Wasser ein nicht kompressibles Medium durch die Leitungen (Vor- und Rücklauf) im Kreislauf gepumpt. Über Wärmeübertrager wird in die Wärme des Wassers aus den Erzeugungseinheiten in die Kreisläufe der Endverbraucher übertragen. Die für die Planung relevanten Parameter sind daher Drücke und Temperaturniveaus der verschiedenen Kreisläufe.

Die Wärmebereitstellung über Fernwärme ist nicht reguliert, so dass die gesamte Wertschöpfungskette über ein Unternehmen bedient werden kann. Dadurch ist die WH in der Lage, entsprechend sowohl Erzeugungskapazitäten als auch Netzkomponenten in die Planung mit einzubeziehen. Durch die Umstellung der Erzeugung von bisher fossil befeuerten Großanlagen auf dezentrale und vielfältige Wärmebereitstellung aus Abwärmenutzung, Großwärmepumpen und unter Verwendung von Speichern wird das Fernwärmeverbundsystem zunehmend modularer und die Planungskomplexität ist gegenüber den Standardprozessen noch einmal erhöht.

3) Künftige Herausforderungen für Gasnetz Hamburg

In den letzten Jahrzehnten hat sich Erdgas zum energetisch größten leitungsgebundenen Energieträger in Hamburg entwickelt. Derzeit liegt in Hamburg nahezu flächendeckend ein Erdgasverteilnetz mit hoher Reservekapazität vor. Zur Erreichung der Klimaziele der Stadt Hamburg besteht allerdings die Notwendigkeit zu einem starken Rückgang der Nutzung von Erdgas, was eine starke Veränderung der Netzstruktur zur Folge hat.

Zur Planung des Gasnetzausbaus gehört die Identifikation von Tendenzen, wo und bis wann in Zukunft überhaupt noch Bedarf an Erdgas besteht, in welchen Regionen und zu welchem Zeitpunkt die Nachfrage an Wasserstoff auftritt und in welcher strukturellen Auflösung Gasnetzanschlüsse benötigt werden. Zudem werden potentiell zukünftig auch dezentrale Wasserstoffeinspeisungen entstehen, die für die Netzplanung insbesondere bzgl. der Gasverträglichkeit eine Rolle spielen. Bei großen Einspeisepunkten, wie etwa durch Wasserstoff-Ferngasnetze oder Großelektrolyseure sind maßgeblich individuelle Kriterien zu beachten.

Für die Transformation der Gasnetze ist weniger die quantitative Bedarfsentwicklung relevant, als vielmehr die Frage, wo überhaupt (noch) ein Gasnetz vorzuhalten ist und mit welchem Energieträger (Erdgas oder Wasserstoff). Der Gasbedarf des Industriesektors ist dabei weitgehend unabhängig von der Entwicklung der Energiesparten Strom und Fernwärme zu betrachten, wohingegen für den Raumwärmesektor das Gegenteil der Fall ist. Übergeordnete Prognosen für den Endenergiebedarf an Raumwärme und darauf aufbauende Bedarfsdeckungsszenarien spielen eine entscheidende Rolle für die Gasnetzplanung. So muss beispielsweise in Gebieten mit vollständiger Durchdringung an elektrischen Wärmepumpen kein Gasnetz mehr vorgehalten werden, wohingegen bei dezentralen gasgefeuerten Technologien zur reinen Wärmeerzeugung oder mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) dieses durchaus relevant ist.

B. Vorteile der integrierten Netzplanung

Der Netzplanungsprozess lässt sich grundsätzlich in die Erstellung eines oder mehrerer Szenarien als Datengrundlage und die eigentliche Netzberechnung mit geeigneten Methoden und Werkzeugen unterteilen. In diesem Sinne werden zunächst die Aufbereitung und Weitergabe der Ergebnisse sowohl in Richtung der Entscheidungsfindung über Maßnahmen und grundsätzliche Investitionsbudgets als auch die weitere Bearbeitung der konkreten Projekt- und Investitionsplanung nicht betrachtet. *iNeP* kopiert zunächst das grundsätzliche Vorgehen in beiden Abschnitten, setzt vor allem aber auch eigene neue Akzente in der Kommunikation zur Entscheidungsfindung. Durch die gemeinsame Berechnung der Netze für Fernwärme, Gas und Strom ergeben sich grundsätzliche technische Lösungen als neuer Eingangsparameter der spartenspezifischen genauen Netzplanung der einzelnen Unternehmen. Dieses bleibt zwingend notwendig, weil die detaillierte Ausgestaltung die Berücksichtigung spezifischer Parameter und die Einordnung in das vorhandene Planungssystem der beteiligten Unternehmen erfordert. Prozessual und zeitlich vorgelagert zur Netzplanung ist die Darstellung des Verhaltens der Netznutzer im zu betrachtenden zeitlichen Verlauf für die Netzberechnung in Form von möglichst direkt verwertbaren Datenlisten. Für andere, unten beschriebene Zwecke, sind voraussichtlich andere Darstellungsformen besser geeignet. Die Methodik für die Erstellung und Darstellung dieser Szenarien ist für die beteiligten Unternehmen im Projekt *iNeP* neu zu entwickeln, weil in den Unternehmen bisher jeweils eigene, nicht miteinander kompatible Modelle verwendet wurden. In den vorherigen Kapiteln ist dieser erste Schritt „Szenariorahmen“ bereits erläutert worden. Der Szenariorahmen muss aus Sicht der Beteiligten nicht nur den Anforderungen aus dem zweiten Schritt der Netzberechnung genügen, sondern darüber hinaus die Kommunikationsfähigkeit innerhalb der drei Unternehmen und in Richtung der (soweit für Gas- und Stromnetz vorhandenen) vorgelagerten Netzbetreiber, der Aufsichts- und Genehmigungsbehörden und letztlich auch gegenüber Politik und Öffentlichkeit ermöglichen.

IV. Stand der Forschung: Aktuelle Studien und Forschung im Bereich Gekoppelte Energienetze, Sektorenkopplung und gemeinsame Netzentwicklungsplanung

Im Gegensatz zur konventionellen Energieversorgung, die maßgeblich durch unidirektionale Leistungsflüsse und zentrale, große Einspeisungen geprägt war, müssen die Netze nun für die durch die Energiewende auftretenden neuen Rahmenbedingungen angepasst werden. Neben den Netzentwicklungsplänen Strom [12] der Übertragungsnetzbetreiber und Gas [13] der Fernleitungsnetzbetreiber, bestehen auch neue Anforderungen auf der Ebene der Verteilnetze.

In diesem Kapitel werden aktuelle Studien und Forschungsprojekte vorgestellt, die sich mit der Transformation der Netze für die leitungsgebundenen Energieträger Strom, Gas und Wärme entweder in spartenseparater Betrachtung oder, wie in *iNeP*, in einer übergreifenden Weise, beschäftigen. Diese seien im Folgenden nur kurz beschrieben.

Im Bereich elektrischer Verteilnetze stehen den konventionellen Planungsansätzen, wie z. B. in [14] beschrieben, heutzutage zunehmende Herausforderungen und veränderte Anforderungsbedingungen durch Einbindung vermehrt dezentraler regenerativer Einspeisungen, zunehmende Durchdringung an Elektromobilität und Wärmepumpen entgegen [15]. Deren Auswirkung sowie aktuelle Planungsansätze finden sich u. a. in der

Verteilnetzstudie Hessen [15]. Diese reicht von der Schaffung des Szenariorahmens auf Basis von drei wesentlichen Energieszenarien bis zur Formulierung von Handlungsempfehlungen. Dort finden auch Ansätze zur Regionalisierung speziell für das Bundesland Hessen Anwendung. In *Verteilnetzausbau für die Energiewende Elektromobilität im Fokus* von 2019 wird zum Themenfeld Elektromobilität auch das netzdienliche Laden für elektrische Fahrzeuge betrachtet [16]. Ein Fokus für die Transformation der städtischen Verteilnetze besteht insbesondere im Projekt *PuBStadt – Neue Planungs- und Betriebsgrundsätze für städtische Verteilungsnetze zur Anpassung an die Anforderungen der Energiewende* [17] der Bergischen Universität Wuppertal. Im daraus publizierten Bericht [18] wird zunächst eine Analyse zur Stadtentwicklung mit bestehenden Trends und aufeinander einwirkenden Einflussfaktoren vorgestellt. Es werden technische, ökonomische, regulatorische und netztechnische Rahmenbedingungen aufgezeigt. Darüber hinaus werden auch Methodiken zur regionalisierten Betrachtung von Technologieentwicklungen und deren Auswirkungen auf die Netze, insbesondere für die Ladeinfrastruktur zur Nutzung von Elektromobilität und Wärmepumpen, dargestellt [18].

Planungs- und Auslegungsprozesse in der Gasversorgung richten sich nach Grundsätzen des DVGW-Regelwerks [19]. Da im Gegensatz zum Stromnetz keine Anschlusspflicht besteht, findet dabei zunächst jeweils eine Markterkundung statt [19]. Die Auslegung der Netze erfolgt für die erwartete Höchstlast, die maßgeblich durch die niedrigste zu erwartende Temperatur und der erwarteten Gleichzeitigkeit der Kundengruppen, bestimmt wird [19]. Wie auch speziell für GNH bereits im Abschnitt III.A.3) erläutert, sehen sich Gasverteilnetzbetreiber mit der Modernisierung von Wohngebieten und der dabei auftretenden Verringerung der Wärmebedarfe und der Substitution von Erdgas durch Biomethan und/oder Wasserstoff konfrontiert [20]. Der Teilaspekt der sich verändernden Wärmebedarfe und deren Auswirkungen auf die Gasverteilnetze werden u. a. in der *Wärmewendestudie* [21] behandelt. Das Thema Wasserstoff wird z. B. im Abschlussbericht der *Metastudie zur Untersuchung der Potenziale von Wasserstoff für die Integration von Verkehrs- und Energiewirtschaft* [22] eingehender beleuchtet. In der *Roadmap Gas – Dekarbonisierung, Versorgungssicherheit und Flexibilität mit klimaneutralen Gasen* [20] des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft von 2020 wird die Transformation des Gassektors auf klimaneutrale Gase in drei wesentlichen Phasen thematisiert. Die erste Phase (bis 2030) beinhaltet neben wachsender Biomethaneinspeisung die verstärkte Nutzung von regenerativem und dekarbonisiertem Wasserstoff. In der zweiten Phase (2030 – 2040) sollen das Potenzial dieser klimaneutralen Gase optimal ausgeschöpft und ein Ausbau für den Import verstärkt werden. Die dritte Phase ab 2040 sieht eine starke Internationalisierung der Märkte und einen stark wachsenden Anteil klimaneutraler Gase am Energiemix vor. Um im Rahmen dieser drei Phasen den vollständigen Ersatz von Erdgas bis zum Jahre 2050 zu gewährleisten, empfiehlt die Studie jeweils die Schaffung geeigneter Marktanreize [20]. In *Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors* des Umweltbundesamts werden langfristige Entwicklungen der Gasmärkte in den Bereichen Stromerzeugung, Mobilität, Gebäude und Industrie sowie Strategien zur Dekarbonisierung des Gassektors, und durch Elektrolyseprozesse erzeugte Gase (Methan und Wasserstoff) [23] thematisiert.

A. Aktuelle Studien zur Betrachtung integrierter Systeme

In diversen Studien werden, im Gegensatz zu separaten Ansätzen der Energiesparten, bereits ganzheitlich Ansätze zur Betrachtung und Gestaltung des Energiesystems gewählt. Diese Untersuchungen zeichnen sich dabei durch die starke Berücksichtigung von Transformationstechnologien zwischen verschiedenen Energieträgern und/oder durch ganzheitliche Gestaltungsansätze des Energiesystems, unter anderem durch Schaffung von Verknüpfungen verschiedener Verbrauchssektoren, aus. Im Folgenden seien dazu ohne Anspruch an Vollständigkeit einige kurz erwähnt. Ein Beispiel ist die *dena – Leitstudie integrierte Energiewende* [24], in welcher ganz bewusst der Begriff der „integrierten Energiewende“ zur Beschreibung eines ganzheitlichen Ansatzes aufgegriffen wird. In diesem ist die gemeinsame Abstimmung der dort genannten Sektoren Industrie, Energie, Gebäude und Verkehr untereinander im Hinblick auf vorkommende technische Anlagen, Märkte und Infrastrukturen zentraler Bestandteil [24]. In *Kursbuch Energiewende* [25] wird ein Leitbild für 100 % erneuerbare Energien für die Sektoren Strom, Mobilität und Wärme vorgestellt. In der Studie *Outlook 2050* [26], als Kooperation des Übertragungsnetzbetreibers TenneT und der Gasunie, wird bereits konkret eine integrierte Netzplanung betrachtet: Es wird angesichts spezieller Bedürfnisse für die Staaten Niederlande und Deutschland eine übergreifende Planung von Strom- und Gasnetzen angegangen. Der Aufbau der Studie erstreckt sich von der Erstellung von Szenarien über Energie-System-Berechnungen, Regionalisierungsaspekte, Infrastrukturanalysen sowie Visualisierung und anschließender Analyse der Ergebnisse [26]. Die Anschlussstudie *Phase II –Pathways to 2050* zielt verstärkt auf die Transformationspfade zwischen den Energieinfrastrukturen und dem Verständnis über bestehende Abhängigkeiten und Beeinflussungen ab. Bei dieser Untersuchung wird ein Modell entwickelt, welches Transformationspotentiale in Europa bei Minimierung von Ausbau- und Betriebskosten identifiziert. Auch hier liegt der Fokus auf der Betrachtung von Deutschland und den Niederlanden [27]. In *Integration erneuerbarer Erzeuger durch Sektorkopplung* des Umweltbundesamtes werden insbesondere die Potentiale zentraler neuer Stromanwendungen zur Substitution fossiler Energieträger bis 2050 als Sektorkopplungsoptionen untersucht. Dabei sind die Umwandlungsstufen von Strom in synthetische Kraftstoffe, Verkehr, Wärme, Industrie, Elektrifizierung von Betriebsmitteln im Gasnetz und Speicherpotentiale von Wasserstoff Inhalt dieser Betrachtung [28]. Die Studie *Das gekoppelte Energiesystem: Energieversorgung im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie e. V*. thematisiert die Möglichkeiten der sektorenübergreifenden Optimierung der Energiesysteme Wärme, Industrie, Strom und Verkehr. Dabei werden verschiedene Transformationspfade und technische Umwandlungen berücksichtigt. Es werden bestehende Barrieren aufgezeigt und Maßnahmen zur Förderung der Sektorenkopplung benannt [29].

B. Aktuelle Forschungsprojekte im Bereich multi-modaler Netze in der Bundesrepublik Deutschland

In der Bundesrepublik Deutschland findet derzeit die Bearbeitung diverser Forschungsprojekte hinsichtlich der Thematik multi-modaler Energienetze der verschiedenen Energiesektoren Strom, Gas und Wärme statt. Diese sind dabei sowohl im Bereich der Ausbauplanung als auch im Netzbetrieb angesiedelt. Die folgende Auswahl von Forschungsprojekten an Einrichtungen der Forschung und

Entwicklung ohne Anspruch an Vollständigkeit soll einen Eindruck über die Vielfältigkeit der Untersuchungsgegenstände in diesem Themenfeld geben.

In *ENSURE – Neue EnergieNetzStruktURen für die Energiewende* [30] wird die Gestaltung eines Energienetzes behandelt, das bidirektionale Lastflüsse und technische Kopplungen der Sektoren Strom, Gas, Wärme und Verkehr ermöglicht. Die Modellregion als sog. „Energiekosmos“ liegt im Norden Deutschlands. In der Projektbearbeitung werden dort innovative Betriebsmittel durch Simulationen und Pilotanlagen getestet. Der Energiekosmos soll somit real mit Pilotanlagen und als digitales Abbild entstehen. In einer fortgeschrittenen Projektphase ist die Erprobung vom systemischen Zusammenwirken einzelner Elemente im Gesamtsystem vorgesehen. Langfristiges Projektziel von *ENSURE* stellt ein Gesamtkonzept für die Energieversorgung bis 2050 mit Einbettung in sozio-ökonomische Rahmenbedingungen und Übertragbarkeit für die Bundesrepublik Deutschland und Europa dar [30].

In Nordrhein-Westfalen steht im Projekt *Sektor-Plan* der Bergischen Universität Wuppertal die sektorenübergreifende Planungsaufgabe für die leitungsgebundenen Energieträger im Fokus. Dazu wird der Kopplung zwischen Strom- und Gasnetzen eine „Schlüsselrolle“ zugesprochen [31]. Diese ist bedingt durch den Stromsektor als maßgebliche Quelle zur emissionsfreien Energieerzeugung einerseits und die hohe Speicherfähigkeit des Gassektors, die Potential zum Ausgleich der Differenz zwischen Last und Erzeugung bietet. Aber auch Wärmenetze werden als zentraler Bestandteil zukünftiger Energiesysteme im Rahmen von *SektorPlan* berücksichtigt. Ziel der zu entwickelnden Planungs- und Betriebsgrundsätze für gekoppelte Netze ist die verstärkte Aufnahmefähigkeit und Verwertung von regenerativ erzeugtem Strom im Gas- und Wärmesektor, was einen unmittelbaren Beitrag zu deren Dekarbonisierung liefert. Daraus sollen auch Handlungsempfehlungen für den regulatorischen Rahmen zur Förderung von Sektorenkopplung geschaffen werden [31].

Das Projekt *Einsatzkonzepte für die Power-to-Gas-technologie auf Verteilungsnetzebene* als Teil des Clusters „Smart-Grids“ des DVGW [32] der bergischen Universität Wuppertal setzt bei der Herausforderung an, dass aufgrund zunehmend volatiler Einspeisung durch PV- und Windenergie ein erhöhter Bedarf der Speicherung besteht, die Versorgungsnetzstruktur des Stromnetzes allerdings ursprünglich nicht dafür ausgerichtet war. Hingegen wird auf Seiten der Erdgasnetze ein Rückgang des Erdgasbedarfs erwartet. Eine im Projekt zu entwickelnde aktive Steuerung von Betriebsmitteln zielt daher darauf ab, das Potential der Gasnetze zur Entlastung der Stromnetze zu ermitteln. Das Konzept „Smart-Grid“ soll somit für gekoppelte Gas- und Stromnetze angewendet werden. Als Kopplungselemente werden Power-to-Gas-Anlagen, bivalente Gasvorwärmanlagen und Mikro-KWK-Anlagen betrachtet [32].

Das Vorhaben *FlexiEnergy – Sektorübergreifende Entscheidungsunterstützung zur flexiblen Gestaltung des Energiesystems unter Unsicherheit* des Software Innovation Campus Paderborn behandelt die sektorenübergreifende Planung von Energienetzen, also eine „integrierte Berücksichtigung von Strom, Gas, Fernwärme und Mobilität“ [33]. Durch die Nutzung von Synergien soll eine kosteneffizientere und emissionsärmere Gestaltung des Energiesystems erreicht werden. Es soll ein Entscheidungsunterstützungssystem aufgebaut werden, welches in der Lage ist, entsprechenden Akteuren Handlungsempfehlungen auszusprechen. Dazu ist zunächst die Gestaltung eines „Wissenssystems“ vorgesehen, welches auftretende Einflussgrößen einschließlich ihrer Wechselwirkungen aufzeigt, woraus verschiedene Szenarien abgeleitet werden. Darüber hinaus werden Modelle zur Simulation und Optimierung für die integrierte Planung entwickelt, um robuste Lösungen für Netzgestaltungsvarianten zu generieren. Dabei werden auch innovative Geschäfts- und Tarifmodelle für z.B. Prosumer oder Quartiersnetze und Mieterstrommodelle einbezogen [33].

Im BMWi-geförderten Projekt *ANAPlan Plus* der Universität Kassel steht eine Methodik zur „integralen Infrastrukturplanung“ für die Anpassung von Versorgungsnetzen für Strom, Erdgas/Biomethan und Wasserstoff im Fokus. Es sollen Optimierungspotenziale unter Beachtung neuer Freiheitsgrade aus sparten- und sektorenübergreifender Betrachtung identifiziert werden [34].

Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Vorhaben *Multi-Resilience* als Teil des interdisziplinären Schwerpunktprogramms „Hybride und multimodale Energiesysteme: Systemtheoretische Methoden für die Transformation und den Betrieb komplexer Netze“ beinhaltet die quantitative Bewertung und Verbesserung von „wechselseitiger Resilienz“ von intelligenten multimodalen Energieverteilungssystemen. Ziel ist es, sich vor Störungen, die innerhalb einer Infrastruktur oder zwischen Infrastrukturen auftreten, zu schützen [34].

Im Rahmen des Projektes *Hybrid Grid – Anschlussmöglichkeiten von Offshore-Windparks unter Berücksichtigung von Sektorenkopplung* werden Varianten zur Landanbindung von Offshore-Windparks untersucht. Die Option der Umwandlung von erneuerbarem Strom zu Gas wirkt sich somit auch auf die Gasinfrastruktur aus, was eine gemeinsame Betrachtung notwendig macht. Auf Basis weiträumiger Übertragungs- und Transportnetzmodelle für Strom- und Gasnetze werden Netzsimulationen angewandt. Die Ergebnisse dienen zur Anwendung in gekoppelten Netzplanungsalgorithmen. Darüber hinaus werden auch Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen angestellt und verschiedene Pfade für Umwandlung und Transport betrachtet [34].

V. Zusammenfassung und Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln sind die wesentlichen Zielstellungen von *iNeP* aufgezeigt worden. Diese beinhalten die Entwicklung eines Verfahrens zur integrierten, das heißt gemeinsamen Netzausbauplanung für die drei leitungsgebundenen Energieträger Strom, Gas und Wärme und die Erstellung einer konsolidierten Roadmap, die diese Ausbaustrategie für die Hamburger Energienetze transparent aufzeigt. Die Verteilnetzbetreiber für die Energiesparten Strom, Gas und Wärme stehen im Zuge der Energiewende vor verschiedenen Herausforderungen. Mithilfe von *iNeP* als ein Werkzeug für eine abgestimmte Herangehensweise zur Erstellung von Bedarfsprognosen sowie der Identifikation geeigneter Energie-Transformationspfade können die Eingangsparameter für die spartenspezifische Netzplanung verbessert werden. Durch die Erstellung des Szenariorahmens soll vor der eigentlichen Netzplanung eine zielführende Abstimmung mit den bereits eingeführten Instrumenten der übergeordneten Planung ermöglicht werden. Ebenso soll eine Vergleichbarkeit im Vorgehen bei anderen Institutionen und Unternehmen herstellbar sein. In der Weiterentwicklung von

Lösungsansätzen (Stichwort: Transformationspfad zur Energiewende) soll der zielführende Dialog mit den diversen Interessensträgern auf eine solide Grundlage gestellt werden können. Die nachfolgende Phase der netztechnischen Untersuchungen im Projekt *iNeP* wird auch bisher in den Unternehmen nicht erforderliche und daher auch nicht verwendete Methoden und Werkzeuge umfassen. Offen, und daher als Betätigungsfeld im Projekt vorgesehen, ist dabei sowohl die Beeinflussung der Zielnetzplanung der einzelnen Unternehmen als auch die zielgerichtete Unterstützung in der Detailplanung im Umgang bisher nicht im großen Umfang kundenseitig eingesetzter neuer Technologien der Energienutzung, bzw. -wandlung.

VI. Danksagung

Das Teilvorhaben „iNeP – Integrierte Netzplanung für die drei Energieträger Strom, Gas und Wärme“ als Teilvorhaben des NRL ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördertes Projekt mit dem für die Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg geltenden FKZ 03EWR007H2.

Literatur

[1] Gasnetz Hamburg GmbH, Wärme Hamburg GmbH, Stromnetz Hamburg GmbH, Technische Universität Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Technische Hochschule Lübeck, „Teilvorhabenbeschreibung zum Ideenwettbewerb: zum Ideenwettbewerb „Reallabore der Energiewende“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) vom 11. Februar 2019,“ 2020.

[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,* 2019.

[3] S. Micheely, „Integrierte Netzplanung der Hamburger Energienetze,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz,* 2020.

[4] T. A. Ender und M. Laack, „Untersuchung der Netzkapazität zur Deckung des zukünftigen Energiebedarfs bei steigender Wasserstoffbeimischung in Gasverteilnetzen,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz,* 2020.

[5] S. Müller, „Die Struktur des Hamburger Gasverteilnetzes – Chancen für die Energiewende Hamburgs,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz,* Bd. 2, 2020.

[6] L.-H. Michael, B. Lkhamsuren, R. Hankers und D. Schulz, „Fernwärme in Hamburg und Deutschland: Netzstruktur, Entwicklungsgeschichte und die regenerative Zukunft,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz; Infrastrukturen leitungsgebundener Energieträger,* Bd. 2, 2020.

[7] J. Hanson, „Netzplanung und Netzberechnung,“ in *Elektrische Energieversorgung 3; Dynamik, Regelung und Stabilität, Versorgungsqualität, Netzplanung, Betriebsplanung und -führung, Leit- und Informationstechnik, FACTS, HGÜ*, 2. aktualisierte Auflage Hrsg., Springer Vieweg, 2018.

[8] B. Pfarrherr, „Aufbau elektrischer Versorgungsinfrastruktur am Bespiel Hamburg,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz,* 2020.

[9] T. Gündel und T. Niepel, „Intelligente Netzplanung für flexible zukunftsfähige Netze,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz,* 2020.

[10] F. Günzler, „Assetmanagement in elektrischen Netzen – nachhaltig in Balance,“ *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz,* 2020.

[11] L. Mittenzwei, T. Gündel, C. Linke und D. Kemnitz, „Anforderungen an Stromnetze steigen auch in großstädtischen Gebieten,“ *Energiewirtschaftliche Tagesfragen,* Bd. 67, p. S. 28 ff, 2017.

[12] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, Transnet BW GmbH, „Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, 2. Entwurf,“ 2021.

[13] FNB Gas, die Fernleitungsnetzbetreiber, „Netzentwicklungsplan Gas 2020-2030, Konsultation,“ 2020.

[14] H. Nagel und R. R. (. Cichowski, Systematische Netzplanung, Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze, 2. Auflage, Berlin, Frankfurt a. M. : VDE Verlag GmbH, VWEW Energieverlag GmbH, 2008.

[15] Bearing Point, Fraunhofer IEE, Kassel, „VERTEILNETZSTUDIE HESSEN 2024 – 2034; Studie im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung,“ 2018.

[16] U. Maier, F. Peter und A. Jahn, „Verteilnetzausbau für die Energiewende - Elektromobilität im Fokus; Schlussfolgerungen zu einer Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und The Regulatory Assistance Project 8RAP),“ Berlin, 26. August 2019.

[17] Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, Bergische Universität Wuppertal, [Online]. Verfügbar unter: https://www.evt.uni-wuppertal.de/de/forschung/forschungsgruppe-netzstrukturen-und-netzplanung/pubstadt-planungs-und-betriebsgrundsaetze-fuer-staedtische-netze.html. [Zugriff am 12. August 2021].

[18] P. Wintzek, S. A. Ali, J. Monscheidt, B. Gemsjäger, A. Slupinski und M. Zdrallek, „Planungs- und Betriebsgrundsätze für städtische Verteilnetze – Leitfaden zur Ausrichtung der Netze an ihren zukünftigen Anforderungen,“ *Neue Energie aus Wuppertal,* Bd. 35, 2021.

[19] 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.

[20] I. Gitzbrecht und M. Noack, „Roadmap Gas; Dekarbonisierung, Versorgungssicherheit und Flexibilität mit klimaneutralen Gasen,“ 2020.

[21] Becker Büttner Held PartGmbB; Becker Büttner Held Consulting AG, „Wärmewendestudie; Die Wärmewendestudie und ihre Auswirkungen auf die Gasverteilnetze“.

[22] G. Müller-Syring, M. Henkel, A. Wehling und M. Weiße, „Metastudie zur Untersuchung der Potenziale von Wasserstoff für die Integration von Verkehrs- und Energiewirtschaft,“ Bonn, 2015.

[23] Umwelt Bundesamt, „Roadmap Gas für die Energiewende - Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors,“ 2019.

[24] T. Bründlinger, J. E. König, O. Frank, D. Gründig, C. Jugel, P. Kraft, O. Krieger, S. Mischinger, P. Prein, H. Seidl, S. Siegemund, C. Stolte, M. Teichmann, J. Willke und M. Wolke, „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende, Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050,“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2018.

[25] Bundesverband Erneuerbare Energie e.V., „Kursbuch Energiewende; Ein Leitbild für 100% Erneuerbare Energie in Strom, Wärme und Mobilität,“ Berlin, 2016.

[26] Gasunie, TenneT, „Infrastructure Outlook 2050A joint study by Gasunie and TenneT on integrated energy infrastructure in the netherlands and Germany,“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.tennet.eu/fileadmin/user_upload/Company/News/Dutch/2019/Infrastructure_Outlook_2050_appendices_190214.pdf. [Zugriff am 03. September 2021].

[27] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH; Institute of Energy and Climate Research (IEK); IAEW at RWTH Aachen University, „Phase II — Pathways to 2050; A joint follow-up study by Gasunie and TenneT of the Infrastructure Outlook 2050“.

[28] M. Witschel, „Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung; Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen,“ 2019.

[29] M. Jansen und C. Sager-Klauß, „Das gekoppelte Energiesystem; Vorschläge für eine optimale Transformation zu einer erneuerbaren und effizienten Energieversorgung,“ Tech. rep. 2017.

[30] Institute for Automation of Complex Power Systems, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen, [Online]. Verfügbar unter: https://www.acs.eonerc.rwth-aachen.de/go/id/nyin. [Zugriff am 20. Oktober 2021].

[31] Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, Bergische Universität Wuppertal, [Online]. Verfügbar unter: https://www.evt.uni-wuppertal.de/en/forschung/forschungsgruppe-netzstrukturen-und-netzplanung/sektorplan-sektorenuebergreifende-

planungs-und-betriebsgrundsaetze-fuer-energienetze.html. [Zugriff am 13. August 2021].

[32] Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, Bergische Universität Wuppertal, [Online]. Verfügbar unter: https://www.evt.uni-wuppertal.de/de/forschung/forschungsgruppe-netzstrukturen-und-netzplanung/einsatzkonzepte-fuer-die-power-to-gas-technologie-auf-verteilungsnetzebene.html. [Zugriff am 13. August 2021].

[33] Software Innovation Campus Paderborn, [Online]. Verfügbar unter: https://www.sicp.de/projekte/flexienergy. [Zugriff am 20. August 2021].

[34] „Fachbereich Elektrotechnik/Informatik, Universität Kassel," [Online]. Verfügbar unter: https://www.uni-kassel.de/eecs/e2n/forschung/projekte. [Zugriff am 12. August 2021].