



DER RAUMBEZUG IM ZUKÜNFTIGEN ENERGIESYSTEM

STRATEGISCHE WÄRMEPLANUNG IM URBANEN RAUM

Von der Fakultät V für Mathematik und Naturwissenschaften der
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg zur Erlangung des Grades und Titels eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

angenommene Dissertation

von Herrn Jürgen Knies

geboren am 31.03.1971 in Geseke

Gutachter:

Prof. Dr. Ingo Mose

Weitere Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Manfred Weisensee

Prof. Dr. Rainer Buchwald

Tag der Disputation: 08.05.2019

Vorwort und Danksagung

Mit dieser Arbeit schließt sich ein Kreis. Im Studium der Landschaftsökologie an der Universität Oldenburg bin ich auf das Phänomen aufmerksam geworden, dass die Abgrenzung eines Untersuchungsgebietes ein Vorgang ist, der selten hinterfragt wird, aber dennoch maßgeblich das Ergebnis beeinflusst. Aussagen wie „In der guten fachlichen Praxis erfolgt die Abgrenzung wie folgt...“ sind eigentlich gleichbedeutend mit „Das haben wir immer so gemacht.“ Einer tief sitzenden Skepsis gegenüber Pauschalaussagen wie diesen verdanke ich es, dass mein beruflicher Werdegang alles andere als einfach war.

Meine langjährige Arbeit im Planungsbüro führte zu der Erkenntnis, dass Raum- und Energieplanung stärker zusammenwirken müssen, soll etwas Sinnvolleres entstehen als nur eine Restriktionsplanung. Ein kurzes, aber im Nachhinein wichtiges Gespräch an einer Ampel im Oldenburger Nieselregen mit Astrid Nieße hat dazu geführt, dass ich mich endgültig in Richtung Forschung aufgemacht habe. Sie war damals als Gruppenleiterin am Institut für Informatik - OFFIS im Bereich Energie tätig. Herr Prof. Dr.-Ing. Manfred Weisensee war seinerzeit wissenschaftlicher Leiter am OFFIS, wodurch sich meine schon bestehende (Teilzeit-)Arbeit an der Jade Hochschule weiter vertiefte. Die wechselnden und teilweise parallel laufenden Verträge und Projekte bei unterschiedlichen Arbeitgebern (OFFIS, Jade Hochschule, iro GmbH) möchte ich nicht im Einzelnen aufzählen. Doch immer hatte ich die Möglichkeit, das Thema Raum und Energie aus sehr unterschiedlichen Blickwinkeln zu bearbeiten.

Dank des Promotionsprogramms Jade2Pro an der Jade Hochschule hatte ich ab 2015 die Gelegenheit, mich voll und ganz darauf zu konzentrieren, die bisher gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse zu sortieren und zu einem Ansatz einer künftigen „Energieleitplanung“ zu formen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Weisensee danke ich herzlich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit sowie für die Freiheitsgrade, die es mir ermöglichten, so manche Irrungen und Wirrungen selbst zu erfahren, die im Rückblick gesehen absolut notwendig waren, um das Thema selbstständig zu erfassen.

Nicht nur thematisch, sondern auch institutionell schließt sich mit der promotionsführenden Universität Oldenburg ein Kreis: In Prof. Dr. Ingo Mose habe ich einen Doktorvater gefunden, der freundlich, verlässlich und bestimmt den Rahmen vorgegeben hat. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken. In den Doktorandenkolloquien der AG Angewandte Geographie und Umweltplanung hatte ich stets die Gelegenheit, sehr offen meine Fragen und Zweifel loszuwerden und zu erörtern. Herrn Prof. Dr. Rainer Buchwald danke ich für die Bereitschaft, sich als Mitglied der Prüfungskommission in das Promotionsverfahren einzubringen.

Die Freiheitsgrade habe ich genutzt, um mich auf Konferenzen auszutauschen und „Projektverbündete“ zu suchen. Vor allem der zeitweise enge Austausch mit den Mitarbeitern des Kompetenzzentrums Energie der Hochschule Osnabrück und einigen OLEC-Mitgliedern war eine große Hilfe. Namentlich möchte ich mich bei Herrn Dr. Oliver Ruch (EWE Brandenburg) bedanken, mit dem ich während einer entscheidenden Phase meiner Arbeit im engen Austausch stand.

Meinen Kollegen an der Jade Hochschule möchte ich dafür danken, dass sie meinen für Ingenieursohren sicherlich „wirren“ Gedankengängen zugehört haben und mir den ein oder anderen Hinweis geben konnten. Mein damaliger Zimmerkollege Andreas Gollenstede hat den Verlauf meiner Arbeit am besten verfolgen können. Ich hoffe, ihn nicht allzu sehr von seinen Promotionsideen abgeschreckt zu haben. Die Gespräche mit Thomas Brinkhoff, Ulrich Michel und weiteren waren sehr ermutigend. Jeder hat ein wichtiges Mosaiksteinchen beigetragen. Duncan Howson möchte ich dafür danken, dass er mich um so manche Klippe bei englischsprachigen Publikationen geschifft hat.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mir eine gesunde Portion Skepsis gegenüber vermeintlich unveränderlichen Dingen mitgegeben haben. Sie haben eine wichtige Basis gelegt.

Der größte Dank gilt meiner Frau Gudrun und unseren Kindern. Früher konnten unsere Kinder Fenja und Lina noch halbwegs etwas damit anfangen, wenn ich ihnen erzählte, dass ich z. B. an der Planung eines Windparks, an dem wir vorbeiradelten, beteiligt war, wobei ich immer wieder klarstellen musste, dass ich die Anlagen nicht eigenhändig zusammengeschaubt hatte. Meine Arbeit an meiner Dissertation erschien ihnen allerdings als so abstrakt, dass sie mir immer wieder den Blick auf die wirklich wichtigen Dinge im Leben ermöglichten. Und sie wurden auch nicht müde, mich daran teilhaben zu lassen.

Gudrun hat mich in der Zeit ertragen, tapfer Korrektur gelesen und mich vor allem immer mal wieder geerdet. Danke!

Zusammenfassung

Im Fokus der öffentlichen Diskussion über die Energiewende scheinen Windenergie, Stromleitungen und steigende Kosten für den Verbraucher im Mittelpunkt zu stehen. Allerdings werden die Klimaschutzziele der Bundesregierung zahlreiche und tiefgreifende Änderungen in den einzelnen Sektoren nach sich ziehen, wenn diese Ziele tatsächlich erreicht werden sollen.

Gut 30 % des Endenergieverbrauchs entfallen auf die Wärmeversorgung (Raumwärme, Brauchwasser), sodass hier ein entsprechend großes Potenzial zu heben ist. Mit der Wärmeversorgung allerdings gerät der urbane Raum stärker in den Fokus. Die Kommunen setzen sich, abgeleitet aus den übergeordneten Klimaschutzzielen, ebenfalls eigene Ziele. So kommt es, dass zwei bisher getrennt betrachtete Planungskulturen aufeinandertreffen: die Energieplanung seitens der Energieversorger sowie seitens der Stadtplanung.

Die bisherige Praxis in Bezug auf energetische Sanierungen im urbanen Bereich geht in der Regel von einer zuvor erstellten Grenzziehung des Untersuchungs- und Projektgebietes aus. Nachbarschaftseffekte und -synergien können so nicht berücksichtigt werden. Die Grenzziehung selbst beeinflusst Vorgehen, Ergebnis und Schlussfolgerungen für die Umsetzung, ohne dass die Akteure diesen Effekt weiter hinterfragen. Für die technische Detailplanung fehlen planerische „Leitplanken“. Auch fördergetriebene Umsetzungen sollten sich in eine räumliche und zeitliche Strategie einfügen lassen, die den jeweiligen Raum- und Zeithorizont überschreiten.

Mit Hilfe von Fuzzy Logic - Methoden werden Eignungsbereiche für Wärmeversorgungsoptionen abgeleitet, die den Anforderungen einer unscharfen Planungsgrundlage genügen. Dies setzt eine intensive Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen räumlichen Konzeptualisierungen, den Siedlungsstrukturen und deren Auswirkungen auf die Planung voraus. Mit Hilfe von Landschaftsmetriken können räumliche Gefügeveränderungen der Eignungsbereiche beschrieben und die Auswirkungen von Reduktionsszenarien analysiert werden. Auf dieser Basis kann das vorhandene und zukünftig erforderliche Potenzial an erneuerbaren Energien für eine dekarbonisierte Wärmeversorgung bilanziert werden. Beispielhaft wird das Potenzial an Photovoltaikstrom von Dachflächen und an industrieller Abwärme betrachtet. Im Sinne des Gegenstromprinzips können aus den Teilprojekten und auf Ebene individueller Entscheidungen Impulse für die übergeordnete Strategie erfolgen.

Im Ergebnis liegt ein Ansatz vor, mit dem die bisherige Form der kommunalen Wärmeplanung zu einer Energieleitplanung und zu einem dynamischen Planungsinstrument weiterentwickelt werden kann. Die Eignungsbereiche können als räumliche Matrix und somit als planerische „Leitplanke“ für die nachfolgende Detailplanung auf Quartiersebene herangezogen werden. Diese Überlegungen haben Auswirkungen auf die Förderpolitik und erfordern eine Weiterentwicklung von E-Government - Prozessen und IT-Standards.

Abstract

The focus of the public debate on energy transition is on wind energy, power lines and rising costs for consumers. However, the climate protection goals of the Federal Government will entail numerous and far-reaching changes in the individual sectors if these goals are actually to be achieved.

A good 30% of final energy consumption is accounted for by heat supply (space heating, domestic hot water), so that a correspondingly large potential can be realized here. With the supply of heat, however, the focus is more on urban areas. The municipalities also set their own targets, derived from the overarching climate protection goals. Thus it comes about that two planning cultures meet that were previously considered separately: Energy planning from the perspective of energy suppliers and from the perspective of urban planning.

Past practice with regard to energetic redevelopments in urban areas has generally been based on previously established limits of the study and project area. Neighborhood effects and synergies cannot be taken into account in this way. The delimitation itself influences the procedure, results and conclusions for implementation, without the actors further questioning this effect. There are no planning "guard rails" for detailed technical planning. Even funding-driven implementations should be able to be integrated into a spatial and temporal strategy that exceeds the respective spatial and temporal horizon. In line with the counter-current principle, impulses from subprojects and individual decision-makers can flow back to influence the overarching strategy.

With the help of fuzzy logic methods, suitability areas for heat supply options are derived that provide a suitable basis for fuzzy planning. This requires an intensive examination of the different spatial conceptualizations, settlement structures and their effects on planning. Landscape metrics can be used to describe spatial structural changes within the suitability areas and to analyze the effects of reduction scenarios. On this basis, the existing and future required potential of renewable energies for a decarbonized heat supply can be assessed. The potential of photovoltaic power from roofs and industrial excess heat are examined as case studies.

The result is an approach with which the previous form of municipal heat planning can be further developed into an energy master plan and utilized as a dynamic planning instrument. The suitability areas can be used as a spatial matrix and thus as a planning "guard rail" for the subsequent detailed planning at district level. These considerations have an impact on funding policy and require further development of e-government processes and IT standards.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Erfordernisse einer integrierten Energieplanung	1
1.2	Smart City und Energie	2
1.3	Abgrenzung von bisherigen Ansätzen der Energie- und Wärmeplanung	2
1.4	Zielsetzung	3
1.4.1	Forschungsziel und Forschungsfragen	3
1.4.2	Zu erwartende Ergebnisse	5
1.5	Aufbau der Arbeit	5
2	Herangehensweise	7
2.1	Wissenschaftlicher Kontext des Begriffs Raumbezug	7
2.2	Wissenschaftstheoretische Einordnung	10
3	Untersuchungsgegenstand und Datengrundlage	13
3.1	Begriffsbestimmungen	13
3.1.1	Effective Radius / Wirkradius / Suchradius	13
3.1.2	Lösungsräume / Eignungsbereiche	13
3.1.3	Indifferente Bereiche / Kopplungsstellen	14
3.1.4	Bezeichnung der Eignungsbereiche	14
3.1.5	Energieplanung / Wärmeplanung / Detailplanung	14
3.1.6	Planungsinstrumente	15
3.2	Räumliche Gliederungseinheiten	16
3.3	Wärmebedarfsdichte, Potenziale und Szenarien	16
3.4	Ermittlung der Eignungsbereiche	16
3.5	Untersuchte Städte	17
4	Ergebnisse und Evaluation	18
4.1	Ableitung von Thesen und Hypothesen	18
4.2	Konzeptuelle Überlegungen	21
4.3	Ergebnisdarstellung Baublock/Raster	23
4.4	Räumlicher Vergleich Baublock / Raster	27
4.4.1	Räumliche Auflösung	27
4.4.2	Vergleich	29
4.4.3	Diskussion und Zwischenfazit	31
4.5	Charakterisierung der Eignungsbereiche mittels der Wärmebedarfe und Wärmelinien-dichte	31
4.5.1	Bramsche / Wallenhorst	33

4.5.2	Oldenburg.....	35
4.5.3	Diskussion und Zwischenfazit	36
4.6	Szenarioanalyse	37
4.6.1	Analyse von Landschaftsmetriken.....	38
4.6.2	Hotspot - Analyse	45
4.6.3	Diskussion und Zwischenfazit	47
4.7	Integration erneuerbarer Energien	49
4.7.1	Photovoltaik und Windstrom	49
4.7.2	Industrielle Abwärme	50
4.7.3	Diskussion und Zwischenfazit	50
4.8	Einzelentscheidungen im Kontext einer kommunalen Wärmeplanung	51
4.8.1	Agentenbasierte Modellierung (ABM)	51
4.8.2	Diskussion und Zwischenfazit	51
4.9	Zusammenfassende Bewertung.....	52
5	Schlussfolgerungen	54
5.1	Eignungsbereiche als Matrix für die Detailplanung.....	54
5.2	Energieleitplanung und Stadtplanung.....	56
5.3	Planungsrecht und E-Government	57
5.4	Dynamisierung.....	57
5.5	Forschungsbedarf	57
	Literatur.....	59
	Anhang	1
	A 1 Fuzzy Membership.....	1
	A 2 Kruskal-Wallis - Tests	3
	A 3 Publikationen	19

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Verortung des Ansatzes der Energieleitplanung (s. a. P 4, eigene Darstellung)	22
Abb. 2: Baublockanalyse Status Quo (unmaßstäblich, Baublockgeometrien der microm Micromarketing-Systeme und Consult GmbH (Neuss))	24
Abb. 3: Rasteranalyse Oldenburg (Szenarien)	25
Abb. 4: Raster- und Baublockvergleich Status Quo Oldenburg (deckungsgleicher Ausschnitt, unmaßstäblich)	26
Abb. 5: Raster- und Baublockvergleich Status Quo Bramsche / Wallenhorst (deckungsgleicher Ausschnitt, unmaßstäblich).....	26
Abb. 6: Vergleich Raster / Baublock – Ortsrand Bramsche (unmaßstäblich, dargestellt auf Luftbilddaten von Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, GIS User Community)	27
Abb. 7: Histogramm der Baublock – Envelope - Längen (25m-Schritte) in Oldenburg .	28
Abb. 8: Histogramm der Baublock - Envelope -Längen (25m-Schritte) in Bramsche/Wallenhorst	29
Abb. 9: Grad der Übereinstimmung von Raster zu Baublock in Oldenburg.....	30
Abb. 10: Grad der Übereinstimmung von Raster zu Baublock in Bramsche/Wallenhorst	30
Abb. 11: Kruskal-Wallis-Test Wärmebedarf auf Baublockebene (Bramsche/Wallenhorst).....	33
Abb. 12: Kruskal-Wallis-Test Wärmelinienichte auf Baublockebene (Bramsche/Wallenhorst).....	33
Abb. 13: Kruskal-Wallis-Test Wärmebedarf auf Rasterebene (Bramsche/Wallenhorst) .	34
Abb. 14: Kruskal-Wallis-Test Wärmelinienichte auf Rasterebene (Bramsche/Wallenhorst).....	34
Abb. 15: Kruskal-Wallis-Test Wärmebedarf auf Baublockebene (Oldenburg).....	35
Abb. 16: Kruskal-Wallis-Test Wärmelinienichte auf Baublockebene (Oldenburg)	35
Abb. 17: Kruskal-Wallis-Test Wärmebedarf auf Rasterebene (Oldenburg)	36
Abb. 18: Kruskal-Wallis-Test Wärmedichtelinie auf Rasterebene (Oldenburg)	36
Abb. 19: Patch Density (PD) für die Szenarien auf Landschaftsebene	41
Abb. 20: Landscape Shape Index (LSI) für die Szenarien auf Landschaftsebene.....	41
Abb. 21: Contagious Probability (CONTAG) für die Szenarien auf Landschaftsebene...	42
Abb. 22: Flächenanteile der Eignungsklassen für die Szenarien in Oldenburg	42
Abb. 23: Flächenanteile der Eignungsklassen für die Szenarien in Bramsche / Wallenhorst	43
Abb. 24: Edge Density (m/ha) der Eignungsklassen für die Szenarien in Oldenburg	43

Abb. 25: Edge Density (m/ha) der Eignungsklassen für die Szenarien in Bramsche / Wallenhorst	44
Abb. 26: Vergleich der nLSI bezogen auf Eignungsgruppen	45
Abb. 27: Verdeutlichung des 250 m Analysebandes im Siedlungskontext (unmaßstäblich, OSM-Kartenhintergrund).....	46
Abb. 28: Szenarienbasierte Hotspot-Analyse von LowEx-Eignungsbereichen in Oldenburg	47
Abb. 29: Modell des Zusammenspiels zwischen Eignungsbereichen und Sanierungsgebiet.....	55
Abb. 30: Eignungsbereiche als Matrix für die Detailplanung (Beispieldarstellung, unmaßstäblich).....	55
Abb. 31: Entwurf des Zusammenspiels zwischen Energieleitplanung und Energiekonzept.....	56

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Forschungsfragen	4
Tab. 2: Liste der Publikationen für die publikationsbasierte Dissertationsschrift	5
Tab. 3 Zuordnung der Raumbegriffe nach Wardenga [33] zu den methodischen Umsetzungen.....	7
Tab. 4: Falsifikation und Gütebewertung.....	11
Tab. 5: Das System der deutschen Raumplanung in Anlehnung an [36, p. 896]	15
Tab. 6: Übersicht über die Bezeichnungen der Eignungsbereiche	23
Tab. 7: Bezeichnung der Szenarien in unterschiedlichen Publikationen.....	37
Tab. 8: Verwendete Metriken auf Landschaftsebene, s.a. [67]	39
Tab. 9: Verwendete Metriken auf Klassenebene, s.a. [67]	39
Tab. 10: Einwohnerdichte der untersuchten Städte bezogen auf unterschiedliche Raumbezüge (Gesamtfläche, Raster, Baublock).....	40
Tab. 11: p-Werte und Konfidenzniveaus der Hotspot - Analyse, vgl. [69]	46

1 EINLEITUNG

Die in der Vergangenheit auf Strom fokussierte Energiewende führte zu Fragen, die aus ebendieser technischen Richtung kommen. So werden Aspekte des Überschussstroms und der sog. „Dunkelflaute“ mit Konzepten hinsichtlich Speicherkapazitäten und Sektorkopplung aus Stromsicht beantwortet. In dem Kontext werden die anderen Sektoren wie Wärme und Mobilität als Stromsenken gesehen [1]. Allerdings greift diese Sichtweise zu kurz und trifft nicht den Kern der Herausforderung, das gesamte Energiesystem schrittweise zu dekarbonisieren.

Die im Klimaschutzplan der Bundesregierung beschlossenen Zielvorgaben [2] werden vor dem Hintergrund der bisherigen Anstrengungen zur Reduktion des Energieverbrauchs und des Einsatzes Erneuerbarer Energien nicht erreicht [3]. Maßnahmen werden in allen Lebensbereichen erforderlich sein, so auch bei der Nutzung von Gebäuden und bei der damit verbundenen Wärmeversorgung. In Deutschland beträgt der Anteil 27 % (Raumwärme) bzw. 5 % (Warmwasser) des Energieverbrauchs in 2015 [4]. Bis zum Jahr 2050 soll der Gebäudebestand nahezu klimaneutral sein [2]. Die vollständige Dekarbonisierung wird alle Sektoren umfassen und eine Abstimmung untereinander erforderlich machen, zumal die damit verbundene zunehmende Elektrifizierung vieler Prozesse zu einer Konkurrenz um erneuerbaren Strom führen wird [5].

Das sich verstärkende Zusammenspiel der Sektoren wird auch dazu führen, dass die Energiewende immer mehr in den Städten stattfinden und Wärme sowie Mobilität umfassen wird [6]. Die Transformation der Energieversorgung ganzer Städte wird eine neue Dimension der Planungs- und Partizipationsformen sowie des Technologieeinsatzes bedeuten. Dies wird durch aktuelle Reurbanisierungstrends verschärft, die sich nicht nur in den Großstädten abzeichnen, sondern sich auch in Klein- und Mittelstädten im Umfeld größerer Städte niederschlagen [7].

1.1 Erfordernisse einer integrierten Energieplanung

Die Energieversorgung spielte in der Stadtplanung bisher eine untergeordnete Rolle. Mittels Satzungen können einzelne Aspekte bei Neubauvorhaben vorgegeben werden. Kommunale Vorgaben für den Bestand können nicht getroffen werden. Hier gelten die jeweiligen Energie-Effizienz-Vorgaben auf Gebäudeebene, die bei Modernisierungen und Umbau zum Tragen kommen. Die weiterhin geringen Sanierungsraten im Gebäudebereich [8] verdeutlichen die Problematik einer geplanten Dekarbonisierung im Wärmesektor [9], wobei die Sanierung und die damit verbundene Rate nur ein Mittel zum Zweck darstellt [10].

Anreize für Sanierungen können geschaffen werden, indem in Sanierungsgebieten (z. B. energetische Stadtsanierung nach dem Förderprogramm 432 der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW 432)) eine umfassende Planung und Beratung durchgeführt und, in Kombination mit § 136 BauGB (Baugesetzbuch), Effizienzmaßnahmen steuerlich gefördert werden [11]. Satzungen können herangezogen, um einen Anschluss- und Benutzungszwang für Fernwärmeversorgung auszusprechen. Von diesem Mittel wurde im Rahmen der energetischen Stadtsanierung allerdings nur selten Gebrauch gemacht, der Einsatz

wird sehr kontrovers diskutiert [11, p. 84]. Der Zwang unterstützt die Monopolstellung einer Energieversorgungsart, was in der Form nur selten akzeptiert wird [ebd.].

Ein Ausweg könnte darin bestehen, die energetische Umstrukturierung mit einer Städtebauförderung zu kombinieren, um Schwerpunkte auf eine sozial verträgliche energetische Sanierung lenken zu können [12]. Hierzu werden in Abstufung kommunal definierte Vorranggebiete (Programmgebiet Städtebauförderung, Programmgebiet Energie, KfW-Vorranggebiet) vorgeschlagen [12, p. 72], die auf die energetischen und sozialen Besonderheiten eingehen. So kann die KfW-Förderung als Breiteninstrument weiter genutzt, in einzelnen Bereichen lokal konzentriert werden, um Entwicklungen in Gebieten zu befördern, die einen energetische Verbesserungsbedarf aufweisen, aber auf Grund der Eigentümerstruktur nur schwer zu erreichen sind [ebd.]. Die Logik dieser Förderungen geht von einer kommunalplanerischen Abgrenzung des Sanierungsgebietes aus, in dem die Daten erhoben und Maßnahmen entwickelt werden.

Die Wärmeplanung wird als ein wichtiges Handlungsfeld gesehen [13] [14]. Um eine energetische Transformation ganzer Städte zu bewerkstelligen, bedarf es zusätzlich zu den Förderprogrammen eines planerischen Ordnungs- und Gestaltungsrahmens, der die räumlichen Planungen in energetischen Planungen ausgestalten hilft [15]. „Häufig fehlt es auf kommunaler Ebene an der langfristig-strategischen Ausrichtung beim Umbau städtischer Energiesysteme.“ [15, p. 25].

Einen umfassenden Ansatz verfolgt die Schweiz mit dem „Kommunalen Richtplan Energie“ [16], der Bilanzen zwischen dem aus Planungen entstandenen Energiebedarf und dem lokalen bzw. regionalen Potenzial vorsieht.

1.2 Smart City und Energie

Vor dem Hintergrund der Vielzahl bestehender Definitionen, was eine Smart City ausmacht [17], wird hier an einer Zuordnung zu einer konkreten Definition verzichtet. Vielmehr wird darauf hingewiesen, dass das Thema Energie sehr bedeutend für eine nachhaltige Stadtentwicklung ist [18] und sich sowohl in technischen Smart City Spezifikationen als auch in partizipativen Ansätzen niederschlägt.

Die technischen Spezifikationen beinhalten Aspekte von der Gebäudeebene bis zu stadtweiten Planungs- und Entwicklungsprozessen [19]. Aus der Erkenntnis, dass allein technische Spezifikationen für eine erfolgreiche Umsetzung nicht ausreichen (s. Kap. 1.1) ist die partizipative, mitgestaltende Einbeziehung der Bewohner einer Stadt entscheidend (s.a. einzelne Definition in [17]). Die Durchführung dieser Partizipationsprozesse kann durchaus mit technischen Systemen unterstützt werden, s. a. [20].

1.3 Abgrenzung von bisherigen Ansätzen der Energie- und Wärmeplanung

Die Berücksichtigung des räumlichen Aspekts in Energiekonzepten folgt meist der Analyse von Energiepotenzialen und Randbedingungen innerhalb einer Energiedomäne [21]. Ein anderer Weg besteht darin, den Standort eines Speichers in einem Fernwärmesystem zu optimieren [22]. Andere Analysen konzentrieren sich auf den Energiebedarf und den optimierten Energiemix auf regionaler Ebene [23].

Das Modell KomMod [24] ist in der Lage, den Energiefluss innerhalb einer Stadt für verschiedene Energiebereiche zu berücksichtigen und zu visualisieren. Kommunen können

dieses Modell nutzen, um Möglichkeiten der Energieankopplung und -erweiterung zu finden und die lokale Energiestrategie zu unterstützen. Aber die räumliche Disaggregation wird weiterhin als ein zu lösendes Problem identifiziert [13, p. 586]. Einige kommunale Energieverbrauchs- und -entwicklungspläne, z. B. Nürnberg [25] und Augsburg [26], sind sektoral strukturiert. Eine energetische Optimierung erfolgt auf Quartiersebene und ist somit auf eine vorgegebene Gebietsabgrenzung zugeschnitten. Optionen zum Verbinden der Energiedomänen werden nicht aufgezeigt.

Einen ganzheitlichen Ansatz repräsentiert der derzeit diskutierte Energieleitplan [27]. Das Projekt UrbanReNet zeigt ebenfalls einen integralen Ansatz zur Kombination verschiedener Energiedomänen [28]. Der Ausgangspunkt des Modellierungsverfahrens ist jedoch eine vordefinierte morphologische Charakterisierung von energetischen Stadtraumtypen [29], die sich größtenteils an Baublöcken orientieren (s. a. Kap. 3.2).

Detaillierte Abgrenzungen und Einordnungen zu bestehenden Ansätzen der Energie- und Wärmeplanung finden sich in den beigefügten Veröffentlichungen im Anhang A 3.

1.4 Zielsetzung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf einer Wärmeplanung aus kommunalplanerischer Perspektive. In der Wärmeplanung wird üblicherweise zunächst eine Gebietsabgrenzung für die Datenerhebung vereinbart (Quartier, Sanierungsgebiet etc.), woraufhin ein Maßnahmenkonzept entwickelt wird. Der hier vorgestellte Ansatz verfolgt ein Bottom-up - Prinzip. Hierbei werden Wärmebedarfsdaten herangezogen, um Bereiche mit Wärmeversorgungsoptionen abzugrenzen, die dann einer Detailplanung zugeführt werden können. Somit wird sichergestellt, dass eine flächendeckende strategische Planung im kommunalen Kontext erfolgt.

Allerdings erfolgt keine Betrachtung der erforderlichen Energiequellen für den Betrieb potentieller Wärmenetze. Die Dekarbonisierung wird auch hier weitergehen und wird im Schlusskapitel thematisiert (Kap. 5).

Der Begriff der Wärmeplanung umfasst mehr als nur die Wärmeplanung im engeren Sinne. Das Konzept der Sektorkopplung (s. Kap. 1) macht eine gemeinsame Betrachtung von Mobilität, Wärme und Strom erforderlich. Aus kommunaler Sicht ist allerdings der Wärmesektor der Bereich, der direkt mit kommunalen Kernaufgaben wie der Stadtplanung in Verbindung gebracht werden kann, sodass die Wärmeplanung unter Berücksichtigung der stärkeren Elektrifizierung zukünftiger Wärmeversorgung ein Leitthema in der räumlichen Planung sein wird [5] und z. B. Potenziale regenerativen Stroms berücksichtigen muss (P 4). Zusätzlich ist die zeitliche Perspektive hinsichtlich verschiedener Szenarien der Wärmebedarfsreduktion zu berücksichtigen. Im Folgenden wird von der strategischen Wärmeplanung auf kommunaler Ebene gesprochen, die die zuvor genannten Punkte beinhaltet. Eine Begriffsdefinition und Einordnung erfolgt in Kap. 3.1.5.

1.4.1 Forschungsziel und Forschungsfragen

Die bisherige Praxis in Bezug auf energetische Sanierungen und Konzepte im urbanen Bereich geht in der Regel von einer zuvor erstellten Grenzziehung des Untersuchungs- und Projektgebietes aus. Die Grenzziehung selbst beeinflusst Vorgehen, Ergebnis und Schlussfolgerungen für die Umsetzung [30], ohne dass die Akteure diesen Effekt weiter

hinterfragen. Dabei kommt eine Vielzahl von fachlichen Perspektiven zum Tragen, die zu sehr unterschiedlichen Abgrenzungen z. B. von einem Quartier führen können [31].

Daraus kann folgende These abgeleitet werden: Die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes beeinflusst das Ergebnis und somit die Handlungsoptionen. Das damit verbundene Problem stellt sich wie folgt dar:

- Eine nicht an die Fragestellung angepasste Definition von Untersuchungsräumen sowie eine
- nicht ausreichende Differenzierung der möglichen Technologien für die jeweils vorliegende Bedarfsstruktur und Potenziale und
- ohne Berücksichtigung von Langfristperspektiven

führen zu Maßnahmen, die die zeitliche und räumliche Dimension in der Lösungssuche nicht adäquat abbilden. Für die technische Detailplanung fehlen planerische Leitplanken. Auch fördergetriebene Umsetzungen sollten sich in eine räumliche und zeitliche Strategie einfügen lassen, die den jeweiligen Raum- und Zeithorizont überschreiten. Im Sinne des Gegenstromprinzips können aus den Teilprojekten Impulse für die übergeordnete Strategie erfolgen.

Es gibt aktuell keinen Planungsansatz, welcher im städtischen Kontext diese Ansprüche erfüllt.

Ziel der Arbeit ist es, mit Hilfe eines energetisch basierten Raumbezugs eine strategische Wärmeplanung zu ermöglichen und Planungsprozesse zu unterstützen.

Folgenden Forschungsfragen wird in dieser Arbeit nachgegangen:

Tab. 1: Forschungsfragen

F1:	Welche räumliche Konzeptualisierung vermittelt zwischen räumlicher und energetischer Planung?
F2:	Wie können Raumanalysewerkzeuge so eingesetzt werden, dass Wärmeversorgungsoptionen räumlich und zeitlich adäquat abgebildet werden können?
F3:	Wie können Potenziale erneuerbarer Energien berücksichtigt werden, sodass eine Aussage über die zukünftige Entwicklungsrichtung getätigt werden kann?
F4:	Inwieweit können Einzelentscheidungen auf Gebäudeebene eine strategische Wärmeplanung unterstützen?

Den Forschungsfragen wird sowohl in Form überprüfbarer Hypothesen (Kap. 4.1) als auch in Form von konzeptuellen Überlegungen (Kap. 4.2) nachgegangen.

1.4.2 Zu erwartende Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit werden

- Ansätze für eine Berücksichtigung der Strategische Wärmeplanung in der kommunalen Planung, sowie
- ein Ansatz für eine energetische Raumbewertung.

entwickelt.

1.5 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist als publikationsbasierte Dissertationsschrift angelegt und bildet den Rahmen für folgende Blind-Review-Publikationen, die sich im Anhang A 3 befinden:

Tab. 2: Liste der Publikationen für die publikationsbasierte Dissertationsschrift

Nr.	Bibliographische Angaben der Publikation	Review
P 1	J. Knies, "The aspect of space in future energy systems," in Sustainable Built Environment Conference 2016 in Hamburg: Strategies, Stakeholders, Success factors, 2016, pp. 1226–1235 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000051699	Double - Blind
P 2	J. Knies, "Shaping Energetic Neighbourhoods": A Dynamic Approach For A Future Proof Urban Energy Planning," in World Sustainable Built Environment Conference, 2017, no. June, pp. 1870–1875 [Online]. Available: http://www.wsbe17hongkong.hk/download/WSBE17 Hong Kong - Conference Proceedings.pdf . [Accessed: 05-Nov-2018]	Double - Blind
P 3	J. Knies, "Räumliche Integration industrieller Abwärme in zukünftige Wärmeversorgungsoptionen," Agit – J. für Angew. Geoinformatik, vol. 3, pp. 98–108, Jul. 2017 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.14627/537633011	Double - Blind
P 4	J. Knies, "A spatial approach for future-oriented heat planning in urban areas," Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag., vol. 16, pp. 3–30, 2018 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.5278/ijsepm.2018.16.2	Single - Blind
P 5	J. Knies, "Einzelentscheidungen im Kontext einer kommunalen Wärmeplanung – ein Modellansatz," Agit – J. für Angew. Geoinformatik, vol. 4, pp. 102–113, 2018 [Online]. Available: http://www.doi.org/10.14627/537647013	Double - Blind
P 6	J. Knies, "Ein Entwurf für das Zusammenspiel von E-Government und BIM zur Unterstützung der Wärmewende," ZFV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinf. und Landmanagement, vol. 6, pp. 397–401, 2018 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.12902/zfv-0234-20	Single - Blind

Herr Howson hat bei der Publikation P 4 die Korrekturlesung durchgeführt.

Aufgrund der stark disziplinären Ausrichtung der Fachzeitschriften und Konferenzen, welche einen anspruchsvollen Review-Prozess gewährleisten, wird der interdisziplinäre Ansatz der vorgelegten Arbeit ebenso wie statistische und metrische Prüfungen hauptsächlich in der vorliegenden Rahmenschrift ausgeführt, um die Aussagen in den Publikationen zu untermauern.

Nach der erfolgten Beschreibung der Ausgangslage und Motivation dieser Arbeit (Kap. 1) erfolgt in Kapitel 2 eine Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext. Der wissenschaftliche Kontext wird zweigeteilt: Zum einen ist eine umfassende Klärung des Begriffs Raumbezug notwendig, um den Titel der Arbeit entsprechend einordnen zu können. Zum ande-

ren erfolgt eine Einordnung der Arbeit in den wissenschaftstheoretischen Kontext und befasst sich mit der Frage, inwieweit einige Aspekte eher analytisch-deduktiv abgeleitet und andere Aspekte empirisch-induktiv belegt werden können.

Kapitel 3 fasst mit Verweis auf die jeweiligen Publikationen den Untersuchungsgegenstand und die Datengrundlage zusammen. Vorangestellt ist eine umfassende Definition und Einordnung der Begriffe, die in den Publikationen verwendet werden.

Kapitel 4 stellt die Ergebnisse mit Verweis auf die Publikationen und aus den statistischen und metrischen Analysen vor. In Kapitel 4.1 werden aus den zuvor gestellten Forschungsfragen überprüfbare Thesen und Hypothesen abgeleitet. Die jeweiligen Teilaspekte betreffend, werden eine Spiegelung der Hypothesen und eine Bewertung vorgenommen.

Konzeptuelle Vorüberlegungen (Fuzziness of Neighborhood) werden vorrangig in den Publikationen P 1 und P 2 behandelt und werden in Kap. 4.2 angerissen. Allerdings ist festzuhalten, dass P 1 zu einem frühen Zeitpunkt entstand und Aspekte beinhaltet, die nicht oder in anderer Form weiterverfolgt werden:

- In P 1 determinieren zeitlich fluktuierende Energieüberschüsse, z. B. aus industrieller Abwärme, die räumliche Unschärfe. Im weiteren Verlauf wird die räumliche Unschärfe den Eignungsbereichen zugeordnet.
- Die Überlegung neuronale Netze zu verwenden, wurde verworfen, da die Eignungsbereiche ein Set an technischen Lösungen repräsentieren und keine Modellierung und Simulation auf Anlagenebene innerhalb eines Eignungsbereiches erfolgen soll. Der Ansatz wird in den folgenden Publikationen auf die Ebene der kommunalen Planung gehoben und behandelt nicht mehr die technische Detailplanung. Der Schwerpunkt wird dahingehend verschoben, dass die kommunale Planung in die Lage versetzt wird, einen Rahmen für die nachfolgende Detailplanung zu setzen, was eher dem kommunalen Planungsverständnis entspricht.

Ein wichtiger Aspekt ist der Vergleich zwischen einer diskreten, vektorbasierten Sichtweise und einer kontinuierlichen, rasterbasierten Sichtweise.

Daher beinhaltet die Rahmenschrift zusätzlich die Analyse und Validierung raumanalytischer Aspekte (Kap. 4.3 - 4.6), die in der Form nicht in Artikeln publiziert werden. Einzelne Aspekte wie der Effekt der fokalen Analyse und der Verteilung der Wärmelinien-dichte in den Eignungsbereichen werden in der Publikation P 4 thematisiert. Eine Vertiefung konnte auf Grund des Publikationsformats mit Schwerpunkt auf Energiesysteme nicht vorgenommen werden.

Die Integration erneuerbarer Energien (Kap. 4.6) wird in den Publikationen P 3 und P 4 erläutert. Die Integration industrieller Abwärme konnte sehr gut abgegrenzt werden und als raumanalytischer Ansatz in Journal für Angewandte Geoinformatik publiziert werden (Publikation P 3). Allerdings sind während der Arbeit systematische Fehler in den Ursprungsdaten aufgefallen, die vom Landkreis Osnabrück für die Städte Bramsche/Wallenhorst zur Verfügung gestellt wurden. Dadurch kommt es zu einer inhaltlichen Überarbeitung der Ergebnisse in der Publikation P 4. Publikation P 4 hat den Schwerpunkt auf den technischen Aspekten der Wärmeversorgung und stellt den Stand der Technik und der Wissenschaft vor.

Kap. 4.8 (Publikation P 5) befasst sich mit dem Aspekt von Einzelentscheidungen und testet die Robustheit der strategischen Wärmeplanung gegenüber Entscheidungen für oder gegen bestimmte Wärmeversorgungsoptionen auf Gebäudeebene (Gegenstromprinzip).

Kap 4.9 beinhaltet eine zusammenfassende Bewertung und leitet in das anschließende Kapitel 5 mit den Schlussfolgerungen über, in dem Hinweise zu verschiedenen Aspekten gegeben und weiterer Forschungsbedarf formuliert wird. So wird in der Publikation P 6 eine mögliche Kombination und Modifikation vorhandener Standards (BIM, XFall, XPlanung) und Verfahren (E-Government) vorgestellt, um langfristig einen Datenpool für die kommunale Wärmeplanung zu schaffen.

2 HERANGEHENSWEISE

2.1 Wissenschaftlicher Kontext des Begriffs Raumbezug

Der Begriff Raumbezug erscheint auf dem ersten Blick einfach, wird aber in verschiedenen Disziplinen aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet. Dies ist in sehr unterschiedlichen Raumbegriffen in der Geographie begründet, die ebenfalls einem Wandel unterliegen. Von rein deskriptiven Ansätzen über quantitative Analysen bis zu Ansätzen aus der Verhaltensforschung liegen verschiedene Sichtweisen auf den Raum vor [32]. Wardenga [33] hat ein Ordnungssystem des Raumbegriffs geschaffen, mit dem eine gleichberechtigte Sicht auf den Raum aus unterschiedlichen Perspektiven möglich ist (s. Tab. 3).

Tab. 3: Zuordnung der Raumbegriffe nach Wardenga [33] zu den methodischen Umsetzungen

Raumbegriff	Erläuterung nach Wardenga [33, p. 8]	Zuordnung
Räume als Container	„„Räume“ werden im realistischen Sinne als „Container“ aufgefasst, in denen bestimmte Sachverhalte der physisch-materiellen Welt enthalten sind.“	Stadtlandschaft, urbaner Raum als Prozessfeld menschlicher Tätigkeiten
Räume als System von Lagebeziehungen materieller Objekte	„„Räume“ werden als Systeme von Lagebeziehungen materieller Objekte betrachtet“. Der Schwerpunkt liegt „auf der Bedeutung von Standorten, Lage-Relationen und Distanzen für die Schaffung gesellschaftlicher Wirklichkeit.“	Ermittlung von Wärmebedarfsdichten und Eignungsbereichen auf Grund ihrer Lage zueinander.
Räume als Kategorie der Sinneswahrnehmungen	„„Räume werden“...“als „Anschauungsformen“ gesehen, mit deren Hilfe Individuen und Institutionen ihre Wahrnehmungen einordnen und so die Welt in ihren Handlungen „räumlich“ differenzieren.“	Begriff der Nachbarschaft
Räume werden konstruiert	„„Räume“ werden in der Perspektive ihrer sozialen, technischen und gesellschaftlichen Konstruiertheit aufgefasst, indem danach gefragt wird, wer unter welchen Bedingungen und aus welchen Interessen wie über bestimmte Räume kommuniziert und sie durch alltägliches Handeln fortlaufend produziert und reproduziert.“	Eignungsbereiche als Kommunikationsmittel

In der Geoinformatik geht der Begriff des Raumbezugs auf ein System von Lagebeziehungen (s. o.) zurück, die in der physischen Welt erfasst bzw. anhand der physischen Welt

abgegrenzt werden können. Raumbezug wird in der Geoinformatik unterteilt in den Raumbezug mit primären Metriken (Koordinaten und deren Genauigkeit) und mit sekundären Metriken (fachliche begründete Abgrenzungen wie Postleitzahlenbezirke, statistische Einheiten, Baublöcke etc.) [34, p. 11].

Die Raumplanung wird eher der Container-Sichtweise zugeordnet [35, p. 840], wobei in der Stadtplanung (hier als ein auf die Stadt beschränktes Teilgebiet der Raumplanung im Sinne einer vorausschauenden und planmäßigen Gesamtgestaltung eines Gebietes, s. a. [36, p. 894] sowie Planungsinstrumente s. Kap. 3.1.6) der Raumbegriff um die Akteurssicht erweitert wird: „Der gemeinsame Raumbezug (Community of Place) als Rahmenbedingung für kollektive Handlungsfähigkeit ist eine voraussetzungsvolle Bedingung.“ [37, p. 234] Nachbarschaftliche Aspekte und Partizipation finden immer mehr Eingang in die Stadtplanung und erweitern so den Raumbegriff, s. a. [38].

Wenn in einem Planungsprozess unterschiedliche Akteure zusammengeführt werden, ist eine Klärung des Begriffs Raumbezug wichtig für das Gelingen des Prozesses, wobei dies mitunter sehr problematisch sein kann. Während z. B. für politische Akteure der institutionelle und territoriale Raumbezug wichtiger ist, ist für wirtschaftliche Akteure der Raumbezug meist nachrangig, da die Zielerreichung im Vordergrund steht. In Anlehnung an die Regionalplanung kann hier auch von einem „Mis-match der Akteursbezüge“ gesprochen werden [39, p. 120].

„Die physischen Eigenheiten des Raumes eröffnen und begrenzen Möglichkeiten des Daseins, Verhaltens und Erlebens. Eigenheiten und Möglichkeiten zusammen bilden den Raum.“ [40, p. 60]. Der Raumbezug ist demnach ein soziales Konstrukt und somit von der Perspektive, Zweck und Intention abhängig, sodass es unterschiedliche Zugänge gibt (metrische, gesellschaftliche, technische etc.). Bei administrativen Gebietsabgrenzungen sind die Grenzziehungen scharf, bei thematischen und fachlichen Abgrenzungen liegt ein Ermessensspielraum vor und wird von der jeweiligen Sichtweise und den zu betrachtenden Akteuren und Objekten bestimmt, vgl. [31]. Das Quartier wird im Kontext einer Wärmeplanung als Handlungsebene verstanden [41], wobei auch hier eine räumliche Definition nicht weiter ausgeführt wird, sondern allgemein „die intermediäre Stellung der Quartiersebene zwischen einer dezentralen Wärmeversorgung auf Gebäudeebene und zentraler Wärmeversorgung auf gesamtstädtischer Ebene“ [41, p. 90] betont wird.

Der Begriff „Nachbarschaft“ ermöglicht es eher, die unterschiedlichen Sichtweisen zu vereinen und die Unschärfe als Qualität zu begreifen und für die Energieplanung zu nutzen (P 1). In Anlehnung an Arbeiten aus der Fernerkundung [42] wird der Begriff „Fuzziness of Neighborhood“ erweitert zu „Fuzziness of Energetic Neighborhood“ (P 1).

In dieser Arbeit wird am Beispiel der Wärmeversorgung das Spannungsverhältnis zwischen einer kommunalen Sicht und einer technischen Sicht aufgezeigt. Mit Hilfe eines gemeinsam abgeleiteten Raumbezugs erfolgt die Vermittlung zwischen Stadtplanung und Energieplanung, sodass von einem intermediären Raumbezug gesprochen werden kann, der somit als ein „Element von Kommunikation und Handlung“ [33, p. 10] dient.

Gebäudekonfigurationen sind sowohl deterministisch bedingt (stadtplanerische Ordnung) als auch von der physischen Eigenheit des Raumes abhängig und somit nicht wiederhol-

bar. Planungsprozesse führen zu neuen Ordnungsstrukturen, wobei sich nicht die Gebäude selbst räumlich neu ordnen, sondern hinsichtlich ihrer Nutzungs- und Versorgungsstruktur neu organisieren können. Bei tiefgreifenden Stadtumbauprozessen können Städte in weiten Teilen umstrukturiert werden. Die Motivation besteht in dem Fall aus einer Mischung aus einer politischen und gesellschaftlichen Umorientierung, die sich städtebaulich niederschlägt. Nicht selten werden in dem Zuge auch technische Neuerungen umgesetzt oder auch erst möglich gemacht. So ermöglichte beispielsweise der umfangreiche Stadtumbau von Eberswalde Anfang des 20. Jh. den Bau der Kanalisation, wurde aber motiviert durch Investoren, die Anlagemöglichkeiten in Immobilien suchten [43, p. 344]. Solche tiefgreifenden Prozesse werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Die oben vorgestellten Ausführungen stellen unterschiedliche konzeptionelle Sichtweisen auf den Raum und deren Auswirkungen auf das Planungshandeln vor.

Ein weiterer, entscheidender Punkt, der durch Sichtweisen auf den Raum determiniert wird, ist die Frage nach den zu verwendenden Raummodellen. Es stellt sich die Frage, ob Objekte bzw. deren Eigenschaften diskret oder kontinuierlich im Raum organisiert sind, vgl. [34, p. 21 f.].

Von Menschen geschaffene Objekte wie z. B. Gebäude, administrative Grenzen etc. liegen diskret vor (Entitys). Sie können durch Attribute und Positionsangaben eindeutig beschrieben werden und sind innerhalb der Grenzen homogen. Sie werden in erster Linie durch vektorielle Geoobjekte repräsentiert. Kontinuierliche Phänomene (Fields), wie Niederschlag, Hangneigung etc. zeichnen sich dadurch aus, dass sie Attributverläufe über den Raum repräsentieren. Sie werden in erster Linie durch Raster-Geoobjekte repräsentiert (ebd.).

Je nach Maßstab und Fragestellung sind viele Phänomene nur auf dem ersten Blick diskret abgrenzbar. Aus Entitäten heraus können kontinuierliche Phänomene abgeleitet werden. Ein eingängiges Beispiel ist die Erstellung von kontinuierlichen Niederschlagsmengekarten aus einzelnen Messpunkten mit Hilfe geostatistischer Analyseverfahren [44]. Auf der anderen Seite können sich maßstabsbedingt Entitäten auflösen und weiter differenziert werden. So führen z. B. graduelle Trocken- bzw. Nässegrenzen zu unscharfen Abgrenzungen von Waldsäumen, die je nach Maßstab genauer erfasst und beschrieben werden können [45, p. 115]. Ein entscheidender Nachteil der diskreten Modellierung ist, dass natürliche und kontinuierliche Phänomene dem diskreten Ansatz unterworfen werden. „The choropleth principle ignores totally the possibility of gradual change, or trend, within a landscape unit...“ [46, p. 214]

Die Theorie der Unschärfe (Fuzzy Logic) bietet einen konkreten Ansatz mit dem Abgrenzungsproblem zwischen diskret und kontinuierlich umzugehen [47]. Fuzzy Logic ermöglicht es, Wert- und Bereichszuordnungen kontinuierlich zu gestalten [48]. In dieser Arbeit wird dabei eine Eignungszuschreibung für unterschiedliche Versorgungsoptionen im Wärmebereich auf Basis von Wärmelinienindichten durchgeführt. Hierzu wird von den Gebäuden (Entitäten) in die Rasterwelt gewechselt, um so zusammenhängende Eignungsbereiche mit Übergängen darzustellen. Der Raum wird als System von Lagebeziehungen materieller Objekte (s. Tab. 3) verstanden, wobei die Raumabgrenzung aus den Daten her-

aus erfolgt, um so dem von Riechel et al. postulierten Anspruch einer intermediären Stellung zwischen Gebäude und Stadt gerecht zu werden [41, p. 90]. Die Methode wird in der Publikation P 4 vorgestellt.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Raummodelle diskret / kontinuierlich miteinander vergleichen zu können wird, erfolgt eine vergleichende Analyse auf Baublockebene (diskret) und auf Rasterebene (kontinuierlich) (s. Kap. 3.2).

2.2 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Bezogen auf den Raumabgrenzungsansatz auf Basis von Wärmebedarfsdaten als eine energieplanerische Komponente einerseits und dem Grundverständnis von Nachbarschaften aus der Stadtplanung andererseits entsteht etwas Neues. Der hier verwendete Ansatz verbindet zwei verschiedene Wissensbereiche und ermöglicht eine gemeinsame räumliche Konzeptualisierung. Dieser Ansatz vermittelt somit zwischen Wärmeplanung und Stadtplanung.

Die Verschränkung der beiden Ansätze und eine regelbasierte Aggregation machen den Raum für diese zwei unterschiedlichen Disziplinen (Stadtplanung und Wärmeplanung) gemeinsam beplanbar. Gleichzeitig besteht weiterhin ein Spannungsverhältnis zwischen Raum und konkreter, einmaliger Örtlichkeit.

Das Spannungsverhältnis zwischen Raum und einer konkreten und einmaligen Örtlichkeit ist im Sinne von Poser [49, p. 327] in Bezug auf die Technikwissenschaften wesentlich. Der Versuch eine konkrete, bessere Wärmeversorgung für z. B. ein Stadtquartier zu entwickeln, macht

1. einen normativen Schritt („Was ist besser als bisher?“) und
2. eine Detailuntersuchung der Situation im Quartier mit angepassten Lösungen notwendig.

Diese Arbeit behandelt allerdings keine Detailmaßnahmen für ein konkretes Quartier, sondern versucht einen Lösungsrahmen zu entwickeln, der räumlich ausreichend genau ist, aber zugleich Spielraum für die Detailplanung lässt, die die Stärke der Technikwissenschaften ist (s.a. „Ebene der lokalen Bedingungen“ gemäß [49, p. 326]). Die Reduktion auf die Wärmebedarfsdaten als Ausgangspunkt der Raumanalysen folgt dem Grundprinzip der Effizienz der Technikwissenschaften: Das Ziel mit wenig Aufwand zu erreichen [49].

Die räumliche Aggregation zwecks Bildung von beplanbaren Bereichen folgt dabei dem Ersten Gesetz der Geographie nach Tobler: „...everything is related to everything else, but near things are more related than distant things.“ [50, p. 236] Somit stellt sich die Frage nach der richtigen Distanzwahl bei den Analysenschritten und nach der räumlichen Auflösung, sprich nach der räumlichen Konzeptualisierung.

Ziel ist es, zusammenhängende Planungsräume zu schaffen, die einer Wärmeplanung zugeführt werden können und dem Gedanken der unscharfen Gebietsabgrenzung der Nachbarschaftsforschung und Stadtplanung folgen. Diese Aussage ist zunächst eine Theorie, die an einem Einzelfall (Städte) zu bestätigen ist (Deduktion).

Die Frage nach der Evaluation ist von der wissenschaftstheoretischen Einordnung abhängig, Zur Zielüberprüfung bietet sich der wissenschaftliche Realismus an, der sowohl deduktive als auch induktive Ansätze des Erkenntnisgewinns verbindet [51]. Dieser geht davon aus, dass es neben der vom Menschen wahrnehmbaren Realität eine objektive Realität gibt, die mit Hilfe empirischer Untersuchungen beschrieben werden kann.

Aus einer Fragestellung werden zunächst ein oder mehrere Thesen bzw. Hypothesen abgeleitet, die als „entscheidbare Beobachtungsaussagen logisch deduziert werden“ [52, p. 97]. Im Sinne des wissenschaftlichen Realismus können Hypothesen falsifiziert, bestenfalls bestärkt, aber nicht verifiziert werden (Grundidee zur Falsifizierbarkeit nach Popper [53]). Grundsätzlich stellt sich somit die Frage, ob die Hypothesen, die aus dem Forschungsziel und den Forschungsfragen abgeleitet werden, zur Überprüfung von Teilaspekten des Ansatzes falsifizierbar sind. Der Mehrwert liegt darin, sich Gedanken zu machen, wie eine Hypothese überhaupt widerlegt werden kann. Dies dient zum einen der Schärfung von Hypothesen, und zum anderen, und das ist entscheidend, auch zur Definition von Szenarien sowie von vergleichenden Analysen, die die Grenzen einer Hypothese ausloten.

Die Frage nach der Güte der Lösung wird ebenfalls vor dem Hintergrund der wissenschaftstheoretischen Einordnung entwickelt. Hierzu werden Metriken herangezogen, die eine Bewertung einzelner Parameter zulassen.

Tab. 4: Falsifikation und Gütebewertung

	Falsifikation	Gütebewertung
Fragestellung	Ist der Ansatz geeignet, das Problem zu lösen?	Wie gut kann der Ansatz das Problem lösen?
Bewertungsmittel	Falsifizierbare Hypothese	Metriken

Die Frage, ob der Ansatz zu objektiv messbar „besseren“ Raumabgrenzungen führt, kann allerdings nicht beantwortet werden. Es geht hierbei nicht um messbar bessere, sondern um eine, in der Vereinigung zweier Disziplinen, räumlich umfassendere Planung. Daher wird auch der Frage nachgegangen, ob unterschiedliche Raumkonzepte zu unterschiedlichen Aussagen hinsichtlich der zu bestimmenden Eignungsbereiche für unterschiedliche Wärmeversorgungsoptionen führen.

Die Frage nach der Güte der Problemlösung ist somit nicht allumfassend zu beantworten, da sich die Arbeit in einem hypothetischen Raum bewegt und nicht mit realen Planungsprozessen verglichen werden kann. Hier liegt das grundlegende Problem vor, dass ein stadtweiter Umbau eines Wärmeversorgungssystems so noch nicht umgesetzt wurde, sondern nur quartiersbezogen. So müssen Metriken herangezogen werden, um erwartete Eigenschaften abzu prüfen, die Auswirkungen von Szenarien zu vergleichen und unterschiedliche räumliche Konzeptualisierungen gegen zu prüfen, um so zu einer Aussage zu gelangen, ob der Ansatz den Erwartungen entspricht.

Die Metriken können im Zuge heuristischer Verfahren herangezogen werden, um mit Hilfe von Statistiken Aussagen über eine eindeutige Bestimmbarkeit und Charakterisierung von Merkmalsausprägungen abgeleiteter Bereiche zu treffen, z. B. eine statistisch gesicherte Abgrenzung von Eignungsbereichen mittels Wärmeliniendichten.

Zusätzlich besteht eine besondere Herausforderung darin, dass sowohl Aspekte der Technikwissenschaft [49, p. 312 ff.] als auch die der Systemtheorie bzw. der Theorie komplexer Systeme [54] ineinandergreifen. Nach Meadow ist die Komplexe Systemtheorie eine Kombination aus linearen, nichtlinearen, dynamischen, selbstorganisierenden, evolutionären, vielfältigen und einheitlichen Beziehungen, die für ein chaotisches Universum sorgen, es aber dadurch interessant machen [54, p. 181].

Während die Ableitung der Eignungsbereiche deduktiv-reduktionistisch erfolgt und induktiv-empirisch belegt werden soll, so kann die Entscheidungsfindung auf Gebäudeebene (Annahme oder Ablehnung der Versorgungsoption) auf dem ersten Blick ganz anderen Gesetzen folgen. So können individuelle Gebäude spezifische Eigenschaften oder aber eine nachbarschaftliche Meinungsbildung zu einem sehr komplexen System werden und somit zu Emergenzen führen.

Eine agentenbasierte Modellierung (ABM) ermöglicht die Abbildung komplexer Interaktionssysteme zwischen Akteuren und ihrer Umgebung, um emergentes Verhalten und dynamische Effekte zu ermitteln.

Grimm & Railsback identifizieren drei Kriterien von emergentem Verhalten eines Systems [55, p. 74]:

1. Emergente Eigenschaften sind nicht einfach die Summe der Eigenschaften der Individuen (Agenten)
2. Emergente Eigenschaften sind von anderer Art als die Eigenschaften der Individuen (Agenten)
3. Emergente Eigenschaften sind meist nicht intuitiv und können nicht einfach aus dem Verhalten der Individuen (Agenten) vorhergesagt werden.

Übertragen auf das Energiesystem können bspw. Auswirkungen von Politikänderungen auf das persönliche Verhalten von Menschen und damit auf die Nutzung und Ausbreitung erneuerbarer Energien beschrieben und vorhergesagt werden. So können Hinweise für das Design eines Energiesystems abgeleitet werden [56], s. a. P 5.

Vor der Modellierung sind allerdings einige Punkte abzu prüfen, ob eine Modellierung überhaupt zulässig ist. In Anlehnung an [57] hat Henson [58, p. 231] hierzu folgende Regeln aufgestellt:

- “1. When the problem can be solved using common sense.
2. When the problem can be solved analytically.
3. When it is easier to perform direct experiments.
4. When the simulation costs exceed the savings.
5. When the resources or time are not available.
6. When system behavior is too complex or can't be defined
7. When there isn't the ability to verify and validate the model.”

Die letzte Regel allerdings stellt in diesem Zusammenhang eine besondere Herausforderung dar. Zufälliges Verhalten im Sinne einer freien irrationalen Entscheidung und somit nur bedingt im Einzelfall vorhersehbar wird mitbetrachtet, um im Sinne von Poser [49, p. 309] auch nicht-empirische Elemente zu berücksichtigen. Dies widerspricht allerdings dem Anspruch der Validierbarkeit von Modellen in der Systemanalyse (Regel Nr. 7). Erschwerend kommt hinzu, dass grundsätzlich empirische Daten für eine externe Validierung fehlen, da solch umfassende Stadtumbauten bisher noch nicht angegangen worden sind. Eine rein empirische Analyse ist allerdings fraglich, da dynamische Effekte (Emergenzen) bei einem Systemumbau kaum vorherzusagen sind [59].

3 UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND UND DATENGRUNDLAGE

3.1 Begriffsbestimmungen

In diesem Kapitel werden die verwendeten Begriffe, die in den einzelnen Publikationen verwendet werden, eingeordnet. Eine Definition technischer Begriffe und Abkürzungen ist in der Publikation P 4 zu finden.

Die Publikationen spiegeln die Auseinandersetzung um Begriffsfindungen wider, sodass durchaus von einer prozesshaften Schärfung und auch Verwerfung von Begriffen gesprochen werden kann.

3.1.1 Effective Radius / Wirkradius / Suchradius

In der Publikation P 1 wird der Begriff ‚Effective Radius‘ verwendet, der dem Begriff Wirkradius aus dem „Leitfaden Wärmelandkarte“ [60] entlehnt ist. Allerdings wird der Begriff in der Publikation P 1 um den Aspekt einer raumzeitlichen Flexibilität ergänzt. Energiepotenziale liegen auf der Zeitachse selten gleichförmig vor, sodass der Wirkradius in der Ausdehnung fluktuieren und unterschiedliche Bereiche z. B. in einer Siedlung oder auch andere Wirkradien erreichen und abdecken kann. In Kombination mit Heat Maps, die die Schwerpunkte von Wärmebedarfe aufzeigen, können sog. „solution areas“ unscharf abgegrenzt werden (s. P 1). Auf diese Weise wird auch der temporär begrenzte Einsatz von z. B. industrieller Abwärme in Wärmenetzen räumlich umrissen. Diese dynamische Sichtweise wird in den folgenden Publikationen nicht weiterverfolgt, da sich herausgestellt hat, dass zum einen die Datenverfügbarkeit für eine zeitliche Auflösung von Abwärmepotenzialen nicht gegeben ist und zum anderen – viel entscheidender – die technische Planung verteilter Kopplungsstellen zwischen Nahwärmenetzen mit gleichbleibender und temporärer Abwärmenutzung nur auf Ebene einer technischen Detailplanung möglich ist. Dies würde allerdings dem Ansatz einer strategischen Wärmeplanung widersprechen.

3.1.2 Lösungsräume / Eignungsbereiche

Der Begriff der Lösungsräume (solution areas) in der Publikation P 1 wird nicht weiter verfolgt. An seiner Stelle tritt mit der Publikation P 2 der Begriff der Eignungsbereiche (suitability areas). Eignungsbereiche werden mit Hilfe des Fuzzy Logic – Ansatzes aus den Wärmebedarfsdaten abgeleitet und repräsentieren Bereiche, in denen sich bestimmte Wärmeversorgungsoptionen (Einzelversorgung, LowEx-Wärmenetze, klassische Wärmenetze) anbieten. Charakteristisch sind die Übergänge einer graduellen Einschätzung der Eignung. Sie repräsentieren ein Set an technischen Komponenten, die zum Einsatz kom-

men können. So werden bspw. in Eignungsbereichen mit Einzelversorgung Wärmepumpen (Luft, oberflächennahe Geothermie, Solarthermie) unter Einsatz von erneuerbarem Strom (Photovoltaik, Wind) eine große Rolle spielen.

3.1.3 Indifferente Bereiche / Kopplungsstellen

Die Idee der in der Publikation P 1 erwähnten Kopplungsstellen wird in darauffolgenden Publikationen in anderer Form weitergeführt. Hierbei spielen die als ‚indifferent‘ identifizierten Eignungsbereiche eine große Rolle. Deren Eignung liegt zwischen zwei Eignungstypen, z. B. zwischen LowEx-Wärmenetz und Nahwärme. Übertragen auf eine technische Umsetzung können diese hybriden Bereiche einen Hinweis geben, dass dort die Netze miteinander verschaltet werden könnten. Je nach Betriebsweise unterscheidet sich ein LowEx-Netz im Winterbetrieb nicht bzw. kaum von einem klassischen Nahwärmenetz. Die LowEx-Netze können in dem Fall als Kalt/Warmnetz betrieben werden. Das heißt, im Sommer wird die Vorlauftemperatur stark abgesenkt und im Winter auf das Niveau eines klassischen Nahwärmenetzes angehoben (s. a. Ausführungen in den Publikationen P 2 und P 4).

3.1.4 Bezeichnung der Eignungsbereiche

Die Definition der Eignungsbereiche erfolgt in den Publikationen. An dieser Stelle wird auf eine teilweise uneinheitliche Bezeichnung eingegangen.

Wie oben erwähnt, stellen die Kalt/Warmnetze eine Form der LowEx-Netze dar. Die im Ansatz entwickelte Ableitung der Eignungsbereiche betrifft u. a. LowEx-Netze im Allgemeinen. In der Publikation P 2 wird auf Kalt/Warm - Netze abgezielt, um den Aspekt der Kopplungsmöglichkeiten zu unterstreichen, in den folgenden Publikationen wird allgemein von LowEx – Netzen gesprochen, wobei in der Publikation P 4 auf die verschiedenen Betriebsweisen eingegangen wird.

Auf die Unterscheidung von sog. Block- bzw. Inselnetzen wird in der Publikation P 4 verzichtet, da im Zuge des Reviewprozesses darauf hingewiesen wird, dass die Abgrenzung nicht nur auf Grund der Wärmeliniendichte vorgenommen werden kann. Insbesondere die räumliche Konfiguration von Wärmeabnehmern mit ähnlichen Bedarfsprofilen ist hier entscheidend.

In dem Zusammenhang ist auch auf die Begriffsentwicklung der Dichte hinzuweisen: Während bei den Publikationen P 1 und P 2 allgemein von Heat Demand Density gesprochen wird, was aus den frühen Überlegungen zur Hotspot - Analyse resultiert, wird in der Publikation P 3 differenzierter mit einer längenbezogenen Wärmebedarfsdichte gearbeitet. Diese Dichteangabe berücksichtigt die modellierte Wärmenetzlänge, um eine Zuordnung zu Wärmeversorgungsoptionen zu ermöglichen. Dieser Begriff wird in der Publikation P 4 zu linear heat density bzw. Wärmeliniendichte (P 5).

3.1.5 Energieplanung / Wärmeplanung / Detailplanung

In den Publikationen und in dieser Arbeit werden im Zusammenhang mit Planung drei Begriffe verwendet, deren Verhältnis zueinander im Folgenden geklärt wird.

Der Begriff der Energieplanung suggeriert, dass die Energiesektoren zunächst sehr offen behandelt werden. Allerdings stammt der Begriff ursprünglich aus der Schweiz und ist sehr eng mit Wärmeplanung verbunden, da die Wärmeversorgung als Bereich gesehen wird,

auf den Kommunen unmittelbar einwirken können [13]. Diese Verkürzung führt dazu, dass die übrigen Energiesektoren ausgeklammert werden, dabei sind auch sie Teil der kommunalen Planung (z. B. Standorte für Windkraftanlagen) bzw. der kommunalen Kommunikationsstrategie (z. B. Solardachkataster).

In der Analyse von Riechel et. al. [15] wird u. a. bemängelt, dass es keinen übergeordneten Planungsrahmen bei der Wärmeplanung gibt. Dieser übergeordnete Rahmen wird in dieser Arbeit mit dem Begriff der strategischen Wärmeplanung überschrieben. Dies setzt sich von der technischen Detailplanung, bei der es um die Konkretisierung der technischen Lösungen geht, die den wirtschaftlichen, sozialen und Klimazielen entsprechen. Die strategische Wärmeplanung bereitet die nachfolgende Detailplanung insoweit vor, als dass auf der strategischen Ebene mit Hilfe des räumlichen und zeitlichen Kontexts die Rahmenbedingungen der Detailplanung vorgezeichnet werden und mit Hilfe von Eignungsbereichen räumlich umrissen werden.

Der Begriff der Planung wird vor allem aus kommunaler Sicht beleuchtet, da es in der Arbeit darum geht, eine Brücke zwischen der kommunalen und der technischen Planungswelt zu bauen. In dieser Arbeit wird der Begriff der Energieplanung differenziert und die strategische Wärmeplanung zu einer Teilmenge einer umfassenderen kommunalen Energieplanung.

Auf Ebene der Instrumente für strategische Planungen hat sich in jüngster Zeit der Begriff der Energieleitplanung herausgeschält, wobei es hierzu noch keine rechtliche Verankerung gibt. Sie wird als informelle bzw. Fachplanung verstanden: „Die Energieleitplanung ist ein Planungsinstrument zur Steuerung der Entwicklung von Energiekonzepten.“[61]

3.1.6 Planungsinstrumente

Neben den Raumkonzepten (s. Kap. 2.1) sind für die Raumplanung die rechtlich verankerten Planungsinstrumente von besonderer Bedeutung, die das Zusammenspiel zwischen den Planungsebenen regeln. Dabei spiegeln sich die föderale Aufgaben- und Kompetenzverteilung zwischen Bund, Ländern und Kommunen in den Planungsinstrumenten und deren lokalen Konkretisierung wider.

Tab. 5: Das System der deutschen Raumplanung in Anlehnung an [36, p. 896]

Staatsaufbau	Planungsebenen	Rechtliche Grundlagen	Planungsinstrumente	Materielle Inhalte
Bund	Raumordnung	Raumordnungsgesetz (ROG)		Grundsätze der Raumordnung
Länder	Raumordnung in den Ländern (Landesplanung)	Raumordnungsgesetz und Landesplanungsgesetz	Raumordnungsplan	Ziele der Raumordnung
	Regionalplanung		Regionalplan	
Kommunen	Bauleitplanung	Baugesetzbuch (BauGB)	Flächennutzungsplan	Darstellung der Art der Bodennutzung
			Bebauungsplan	Festsetzungen für die städtebauliche Ordnung

Auf kommunaler Ebene wird über das BauGB eine Vielzahl von Belangen koordiniert und teilweise mit Hilfe von Fachplanungen aufeinander abgestimmt. So wird in § 1 Abs. 6 Nr. 7f BauGB „die Nutzung erneuerbarer Energien sowie die sparsame und effiziente Nutzung von Energie“ als Belang aufgeführt. Eine Fachplanung im eigentlichen Sinne existiert hierzu allerdings nicht, s. a. Kap. 1.4.1.

3.2 Räumliche Gliederungseinheiten

In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt: Eine von zuvor abgegrenzten Bereichen (diskrete Objekte) ausgehende Analyse und eine aus den Daten abgeleitete unscharfe Grenzfindung auf Rasterbasis (kontinuierliche Phänomene), s. Kap. 2.1.

Nach der Methodik von Hegger & Dettmer [29] werden zunächst aus Einzelgebäuden bestehende sog. „Stadtbausteine“ definiert. Hierbei handelt es sich um „Siedlungsformen wie Einfamilienhausgebiete, Zeilenbebauung und Blockrandbebauung.“ [29, p. 6] „Die Begrenzung der Sektion erfolgt durch einen den Stadtbaustein umgebenden Straßenraum oder aus den topografisch bedingte Besonderheiten wie z. B. Flussläufe.“ [29, p. 11] Die Grenzen eines Untersuchungsgebietes sollten allerdings flexible gehandhabt werden, „um ... nachbarschaftliche Vernetzungsoptionen ... einbeziehen zu können.“ (ebd.) Diese Flexibilität bezieht sich nicht auf die „Stadtbausteine“, die als solches unverändert bleiben.

Die Definition der „Stadtbausteine“ erinnert allerdings stark an die der Baublöcke: „Baublöcke bilden nach den Gebäuden die kleinste räumliche Einheit. Sie werden durch ein Straßengeviert oder bei Randbebauung durch die Grundstücksgrenze im Übergang zum Freiraum abgegrenzt. Innerhalb von Baublöcken herrschen in der Regel eine dominante Nutzungsart und ein dominanter Gebäudetyp vor.“ [62, p. 1]

Auf Grund der sehr engen Nähe hinsichtlich der Definitionen werden Baublöcke als Gliederungseinheit für diskrete Objekte herangezogen. Die digitalen Baublöcke der Städte Oldenburg, Bramsche und Wallenhorst stammen von der microm Micromarketing-Systeme und Consult GmbH (Neuss) und basieren auf einem Auszug des Digitalen Basis-Landschaftsmodells (ATKIS Basis-DLM) vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit Stand 2016.

Die Methode für die rasterbasierte Analyse unter Berücksichtigung von unscharfen Grenzen wird ausführlich in der Publikation P 4 vorgestellt.

3.3 Wärmebedarfsdichte, Potenziale und Szenarien

Die Datengrundlage wird in den Veröffentlichungen im Anhang A 3 ausführlich dargestellt, sowie die Methoden der Ermittlung des Photovoltaikpotenzials. Für die Einbeziehung der industriellen Abwärme wird ein vereinfachtes Modell in P 3 vorgestellt und am Beispiel Bramsche/Wallenhorst beispielhaft durchgeführt. Die Szenarien hinsichtlich der Wärmebedarfsreduktion werden ebenfalls in den Artikeln im Anhang 2 dargestellt.

3.4 Ermittlung der Eignungsbereiche

Die räumliche Analyse der Wärmebedarfsdaten zur Ermittlung von Eignungsbereichen unterscheiden sich auf Grund der unterschiedlichen räumlichen Konzepte fundamental.

Die Analyse auf Rasterebene wird v. a. in P 4 beschrieben. Zunächst wird die Linienlänge eines potentiellen Wärmenetzes pro Rasterzelle ermittelt, wobei der Durchschnittswert der

Linienlängen in den Nachbarzellen herangezogen wird, um den räumlichen Kontext abzubilden und Extremwerte zu vermeiden. In einem weiteren Schritt wird der pro Rasterzelle summierte Wärmebedarf (Status Quo, 2020, 2030 und 2050 in den jeweiligen Szenarien) durch die Linienlänge geteilt und in $\text{MWh}/(\text{m} \cdot \text{a})$ dargestellt. In einem weiteren Schritt wird dieser Wärmelinienichte eine Eignung für bestimmte Wärmeversorgungsoptionen zugeordnet, wobei dies über eine Fuzzy Membership erfolgt, die zuvor aus Literaturdaten abgeleitet wurde. Eine mathematische Beschreibung findet sich in Anhang A 1. Auch hier kommt eine weitere fokale Analyse der Eignungen unter Berücksichtigung der Nachbarzellen zum Tragen, um die Körnigkeit der Analyseergebnisse zu reduzieren und Randeffekte zu verringern (P 4). So kann der räumliche Kontext einer Rasterzelle und die räumlichen Erfordernisse einer leitungsgebundenen Wärmeversorgung passender abgebildet werden.

Die räumliche Konzeptualisierung von Baublöcken folgt einer anderen Idee. Hierbei handelt es sich um in sich homogene Baustrukturen, die einer Untersuchung zugeführt werden. Daher erfolgt die Ermittlung der Eignung für Wärmeversorgungsoptionen ohne die oben angeführte zweite fokale Analyse. Die Abgrenzungsunschärfe der Baublöcke führt es mit sich, dass die Leitungslängen der Umgebung nicht ausreichend berücksichtigt werden. Da Baublöcke durch sie umgebende Straßen abgegrenzt werden, befinden sich teilweise die erforderlichen und modellierten Leitungen außerhalb des Baublocks. Um die Leitungslänge für jeden Baublock ermitteln zu können, wird um jeden Baublock ein Puffer von pauschal 6 m erzeugt, um sicher zu gehen, dass die umgrenzenden Leitungsschnitte in den Straßen erfasst werden. Diese werden den Leitungslängen den innerhalb des jeweiligen Baublocks befindlichen Leitungslängen zugeschlagen.

Die Eignung wird wie bei den Rasterzellen auf Grundlage der Wärmelinienichte ermittelt und dem Baublock zugeordnet.

Die Herangehensweisen unterscheiden sich somit in einem wesentlichen Punkt: Während bei der Rasteranalyse für jede Zelle die Nachbarschaft berücksichtigt wird (Mittelwert der umliegenden Leitungslängen und eine fokale Analyse der Eignung) folgt die Baublockanalyse der Sichtweise, für jeden Baublock einzeln die Eignung zu ermitteln.

Eine vergleichende Ergebnisdarstellung erfolgt in Kap. 4.3.

3.5 Untersuchte Städte

Am Beispiel der Städte Oldenburg, Bramsche und der Gemeinde Wallenhorst werden die Wärmebedarfsdaten der Gebäude herangezogen, um jeweils stadtweite Eignungsbereiche für Wärmeversorgungsoptionen zu analysieren.

Zum 31.12.2016 weisen die Stadt Oldenburg 165.711, die Stadt Bramsche 31.110 und die Gemeinde Wallenhorst 23.125 Einwohner auf (gemäß Landesamt für Statistik Niedersachsen (LSN)). Die Stadt Oldenburg repräsentiert eine deutsche Großstadt mit großen, zusammenhängenden Siedlungsflächen unterschiedlicher Dichte.

Für die Analyse der Eignungsbereiche wird die im Norden an Oldenburg angrenzende Siedlungsfläche von Metjendorf (Gemeinde Wiefelstede) hinzugezogen, um aufzuzeigen, dass energetische Planungen nicht an administrativen Grenzen gebunden sind. Allerdings konnten für Metjendorf keine Baublöcke bezogen werden, sodass der Vergleich zwischen

Raster und Baublock ohne Metjendorf durchgeführt wird, um identische Abdeckungen zu berücksichtigen und eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Die Stadt Bramsche und die Gemeinde Wallenhorst, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander im Landkreis Osnabrück (Nds.) befinden, repräsentieren Mittelstädte mit einer Bebauung unterschiedlicher Dichte.

Die Charakterisierung und Analyse der Siedlungsstrukturen wird in Kap. 4.6 näher beleuchtet.

4 ERGEBNISSE UND EVALUATION

4.1 Ableitung von Thesen und Hypothesen

Zunächst werden aus den in Kap. 1.4.1 vorgestellten Forschungsfragen Thesen und Hypothesen abgeleitet.

F1: Welche räumliche Konzeptualisierung vermittelt zwischen räumlicher und energetischer Planung?

Die Forschungsfrage 1 zielt auf eine qualitative Analyse unterschiedlicher Raummodelle ab. In Kap. 2.1 wird ausführlich auf den Unterschied zwischen diskreten und kontinuierlichen Raummodellen eingegangen. Darüber hinaus werden die Begriffe der räumlichen Unschärfe und der Eignungsbereiche eingeführt (s. Kap. 4.2). Um auszuschließen, dass gänzlich unterschiedliche Ausgangslagen miteinander verglichen werden, wird für die weitere Analyse von folgender These ausgegangen:

F1-T2: Die Eignungsbereiche sind in der Raster- als auch in der Polygonwelt weitestgehend deckungsgleich (s. Kap. 4.4)

Zwecks quantitativer Schärfung werden folgende Hypothesen überprüft:

F1-H1: Je größer und zusammenhängender Eignungsbereiche sind, desto größer ist auch der Grad der Übereinstimmung zwischen Baublock- und Rasterergebnis.

F1-H2: Je kleinteiliger die Siedlungsstruktur ist, desto stärker weicht die Übereinstimmung zwischen Raster- und Polygonbereichen ab.

Um den Hypothesen nachgehen zu können, wird in Kapitel 4.4 ein Vergleich zwischen einer baublock- und einer rasterbasierten Analyse durchgeführt. Da die dabei zu vergleichenden Ergebnisse der Eignungsbereichsableitung auf unterschiedlichen Raumkonzepten fußen, ist ein direkter Vergleich schwierig, sodass zunächst eine ausführliche Diskussion der erforderlichen räumlichen Auflösung für den Vergleich erfolgt.

Die zweite Forschungsfrage zielt auf den Einsatz passender Raumanalysewerkzeuge ab, um Eignungsbereiche für unterschiedliche Wärmeversorgungsoptionen zu detektieren.

F2: Wie können Raumanalysewerkzeuge so eingesetzt werden, dass Wärmeversorgungsoptionen räumlich und zeitlich adäquat abgebildet werden können?

Um der Forschungsfrage nachgehen zu können, werden zwei Thesen aufgestellt. Die erste These zielt auf eine vergleichende Analyse zwischen dem raster- und dem vektorbasierten Raummodell ab.

F2-T1: Der rasterbasierte Analyseansatz ermöglicht eine adäquate Ermittlung von Eignungsbereichen.

Um aufzuzeigen, dass Eignungsbereiche die zugrundeliegenden Wärmebedarfe und Wärmelinienindichten trotz der räumlichen Prozesse weiterhin repräsentieren, werden folgende statistische Hypothesen formuliert:

F2-H1: Die Eignungsbereiche unterscheiden sich nicht statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmebedarfe (Nullhypothese F2-H1-H0).

Die Eignungsbereiche unterscheiden sich statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmebedarfe (Alternativhypothese F2-H1-H1).

F2-H2: Die Eignungsbereiche unterscheiden sich nicht statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmelinienindichte (Nullhypothese F2-H2-H0).

Die Eignungsbereiche unterscheiden sich statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmelinienindichte (Alternativhypothese F2-H2-H1).

Den Hypothesen wird in Kap. 4.5 mit Hilfe an die Datenlage angepasster statistischer Tests nachgegangen.

Die Berücksichtigung der Reduktionsszenarien ermöglicht das Aufspannen eines Korridors, in dem unterschiedliche Handlungsoptionen für Entscheider aufgezeigt und raumzeitlich differenziert werden. Diese Einschätzung führt zur zweiten These:

F2-T2: Die Szenarien zur Reduktion des Wärmebedarfs führen zu einem Wandel in der räumlichen Konfiguration von Eignungsbereichen und deren Übergangsbereichen.

Die These kann aus zwei Blickwinkeln betrachtet werden:

- a) Aus einem räumlich-stationären Blickwinkel, bei dem der Wandel der räumlichen Konfiguration mit Hilfe von Metriken beschrieben werden, und
- b) aus einem räumlich-dynamischen Blickwinkel, bei dem eine Verlagerung von Hotspots von Eignungsbereichen beschrieben werden.

Beim räumlich-stationären Blickwinkel kann ein Wandel der räumlichen Konfiguration wiederum auf verschiedenen räumlichen Ebenen beschrieben werden:

- a) bezogen auf die gesamte Siedlungsstruktur, und
- b) bezogen auf die Klassen der Eignungsbereiche.

Da an dieser Stelle keine Detailbetrachtung einzelner Quartiere vorgenommen wird, wird die Veränderung auf Ebene einzelner Rasterzellen nicht analysiert.

Zwecks Überprüfung der These in Bezug auf den räumlich-stationären Blickwinkel werden folgende Hypothesen aufgestellt und mit Hilfe sog. Landschaftsmetriken in Kap. 4.6.1 nachgegangen:

- F2-H3: Je stärker die Reduktion des Wärmebedarfs über die Zeit ausfällt, desto geringer wird die räumliche Variabilität der Siedlungsstruktur bezogen auf Eignungsbereiche.
- F2-H4: Je stärker die Reduktion des Wärmebedarfs über die Zeit ausfällt, desto geringer wird die räumliche Variabilität bezogen auf Eignungsbereiche mit geringer Wärmelinienichte.

Zwecks Überprüfung der These in Bezug auf den räumlich-dynamischen Blickwinkel wird folgende Hypothese aufgestellt und mit Hilfe einer Hotspot - Analyse in Kap. 4.6.2 geprüft:

- F2-H5: Je stärker die Reduktion des Wärmebedarfs über die Zeit ausfällt, desto stärker verlagern sich Schwerpunkte der Eignungsbereiche.

Die dritte Forschungsfrage befasst sich mit der Integration erneuerbarer Energien in die zukünftige Wärmeversorgung. Hierbei werden vor dem Hintergrund der Sektorkopplung insbesondere die erneuerbare Stromerzeugung berücksichtigt sowie die Nutzungsmöglichkeiten industrieller Abwärme. Der Einsatz von Strom wird in erster Linie für verschiedene Aspekte der Wärmeversorgung (Brauchwasseraufbereitung, Betrieb von Wärmepumpen etc.) verstanden. Andere erneuerbare Wärmequellen wie die Tiefe Geothermie werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

- F3: Wie können Potenziale erneuerbarer Energien berücksichtigt werden, sodass eine Aussage über die zukünftige Entwicklungsrichtung getätigt werden kann?

Da der Analyseansatz eine explizit räumliche Komponente aufweist, reicht hier eine rein bilanzielle Herangehensweise nicht aus, was in folgender These mündet:

- F3-T1: Mit Hilfe eines räumlichen Matchings auf Stadtebene können Potenzial und Bedarf ausreichend genau bilanziert und abgeglichen werden.

Hinsichtlich der Integration erneuerbaren Stroms wird ein hoher Nutzen für den Wärmesektor unterstellt und folgende Hypothese aufgestellt:

- F3-H1: Je mehr lokal produzierter erneuerbarer Strom für die Wärmeversorgung zur Verfügung steht, desto besser kann die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung erfolgen.

Der Hypothese wird in Kap. 4.7.1 nachgegangen und insbesondere auf die Publikation P 4 verwiesen.

Auch hinsichtlich der Integration von Abwärme wird ein hoher Nutzen für den Wärmesektor unterstellt und folgende Hypothese aufgestellt:

- F3-H2: Je mehr industrielle Abwärme integriert wird, desto besser kann eine Dekarbonisierung der Wärmeversorgung erfolgen.

Der Hypothese wird in Kap. 4.7.2 nachgegangen und insbesondere auf die Publikationen P 3 und P 4 verwiesen.

Die bisherigen Ausführungen haben die Ableitung von Eignungsbereichen und deren räumliche Konfiguration und energetische Ausprägungen zum Inhalt. Was noch fehlt, ist die Ebene von Einzelentscheidungen, die sich einer strategischen Wärmeplanung entweder fügen oder davon abweichen. Im Sinne des Gegenstromprinzips wird die Robustheit gegenüber bzw. Modifizierbarkeit der strategischen Wärmeplanung durch hypothetische Einzelentscheidungen überprüft.

Somit befasst sich die letzte Forschungsfrage mit der Abschätzung der Auswirkungen vieler Einzelentscheidungen auf Gebäudeebene auf eine strategische Wärmeplanung:

- F4: Inwieweit können Einzelentscheidungen auf Gebäudeebene eine strategische Wärmeplanung unterstützen?

Daraus folgt folgende pointierte Aussage:

- F4-T1: Individuelle Entscheidungen haben keine Auswirkung auf eine strategische Wärmeplanung.

Um der Forschungsfrage auf den Grund gehen zu können, wird folgenden Hypothesen in Kap. 4.8 mit Verweis auf die Publikation P 5 nachgegangen:

- F4-H1: Je höher der Freiheitsgrad bei der Entscheidung, desto stärker fällt die Abweichung in Bezug auf die Eignungsbereiche aus.
 F4-H2: Abweichende Individualentscheidungen haben bis zu einem bestimmten Grad keinen Einfluss auf einen Eignungsbereich.

Hierzu wird ein Modellansatz vorgestellt, mit dem auf Basis der Theorie komplexer Systeme und mit Hilfe agentenbasierter Modellierung (s. a. Kap. 2.2) der Fragestellung auf den Grund gegangen werden kann und mit dem die Hypothesen überprüft werden können.

Die oben erwähnten Freiheitsgrade bewegen sich in einem technisch machbaren Rahmen und werden in der Publikation P 5 genauer erläutert.

Im Folgenden werden die einzelnen Analysen mit Referenz auf die jeweilige Publikation (s. Liste in Kap. 1.5) vorgestellt. In Kap. 4.9 erfolgt eine zusammenfassende Bewertung.

4.2 Konzeptuelle Überlegungen

Die konzeptuellen Überlegungen umfassen zu einen die Entwicklung des Begriffs „Fuzziness of Neighborhood“ im Zusammenhang mit dem Begriff der „Energetischen Nachbarschaft“ als wesentliche Grundlage für den räumlichen Unschärfebegriff (s. Kap. 2.1, sowie

P 1 und P 2 unter Berücksichtigung der Ausführung in Kap. 1.5). Zum anderen wird der generelle Unterschied zwischen diskreten und kontinuierlichen Raumkonzepten behandelt, sowie die Frage nach der angemessenen räumlichen Auflösung, die auf einer Rasterweite von 100 x 100m festgesetzt wird (P 4, s. a. [63]). Außerdem werden die Auswirkungen der räumlichen Glättung auf das Ergebnis dargelegt und diskutiert (P 4).

Während der Begriff der räumlichen Unschärfe ursprünglich über ein fluktuierendes Abwärmeangebot aus der Industrie motiviert wurde, so hat sich im Verlauf der Arbeit die Unschärfe auf den Sachverhalt der Eignungsbereiche verlagert. Eine zeitliche Auflösung der Energiepotenziale wird im Weiteren saisonal-bilanziell berücksichtigt.

In der Auseinandersetzung mit der Literatur hat sich der kommunalplanerische Kontext als ein wesentlicher Faktor für eine erfolgreiche Wärmewende herausgestellt. Der hier vorgestellte Ansatz versucht, die kommunale Planung in die Lage zu versetzen, einen Rahmen für die nachfolgende Detailplanung zu setzen, was eher dem kommunalen Planungsverständnis entspricht. Die Detailplanung beinhaltet die technische und wirtschaftliche Planung im Rahmen unterschiedlicher kommunaler Planungsinstrumente (Bebauungsplan, Energetische Stadtsanierung etc.).

Die folgende Abb. 1 verdeutlicht die planerische Einordnung des Ansatzes:

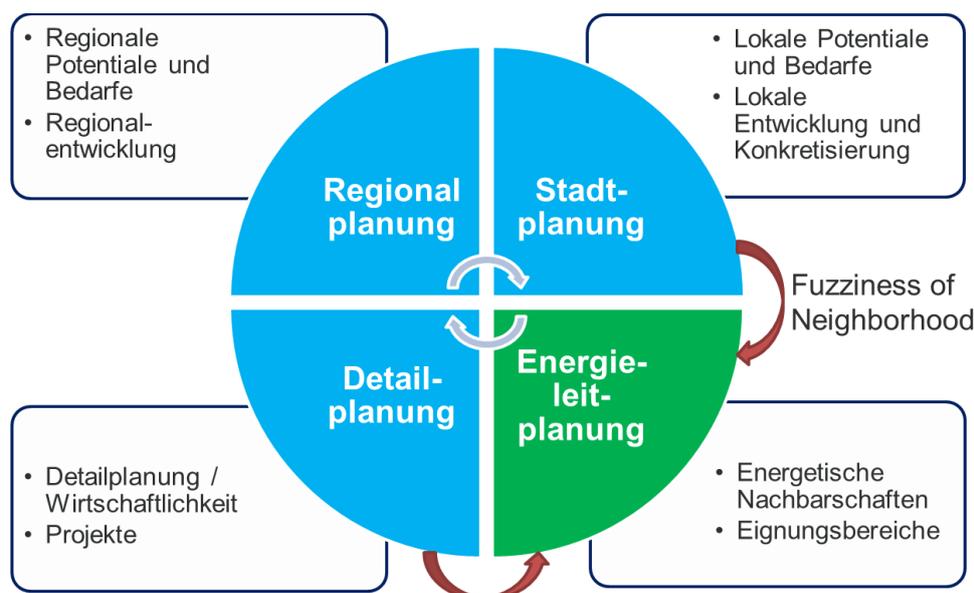


Abb. 1: Verortung des Ansatzes der Energieleitplanung (s. a. P 4, eigene Darstellung)

Da die Publikationen keinen Platz für einen grundsätzlichen Vergleich zwischen diskreten und kontinuierlichen Raumkonzepten bieten, wird dies in den folgenden Kapiteln dargestellt. So folgt aus einer analytisch-deduktiven Bestimmung des Begriffs der „Fuzziness of Neighborhood“ die Grundlage für die nachfolgende empirisch-induktive Analyse, wobei die Vorzüge des kontinuierlichen Raumkonzeptes (Raster) darin besteht, dass die beschriebene Unschärfe räumlich umgesetzt werden kann.

4.3 Ergebnisdarstellung Baublock/Raster

An dieser Stelle folgt in Ergänzung zu den Publikationen eine kartografische Ergebnisdarstellung. Die Methode zur Ableitung der Eignungsbereiche wird in Kap. 3.4 erläutert. Die Festlegung auf ein 100 x 100 m Raster und dessen Begründung ist Teil der räumlichen Konzeptualisierung und wird in der Publikation P 4 dargelegt.

Da in den Publikationen die Bezeichnungen der Eignungsbereiche auf Grund der Sprache abweichen, wird in der folgenden Tabelle eine Aufstellung der einzelnen Bezeichnungen vorgenommen.

Tab. 6: Übersicht über die Bezeichnungen der Eignungsbereiche

	Deutsche Bezeichnung	Englische Bezeichnung	Codierung
Einzelversorgung	EV++	Single Supply ++	1
	EV+	Single Supply+	2
	EV	Single Supply	3
	indiff. EV/LowEx	Indiff.	5
LowEx-Netz	LowEx	C/H	10
	LowEx+	C/H+	20
	LowEx++	C/H++	30
	indiff.	indiff.	50
Klassische Nahwärme	kl. Nahw.	cDH	100
	kl. Nahw.+	cDH+	200
	kl. Nahw.++	cDH++	300
	indiff. kl. Nahw./EV	indiff.	500
	indiff.	indiff.	1000

Die Codierungen werden insbesondere in der statistischen Analyse (s. Kap. 4.5) verwendet.

Die Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der Baublockanalyse (Status Quo) für Oldenburg und Bramsche/Wallenhorst und verdeutlicht die sehr unterschiedlichen Siedlungsstrukturen.

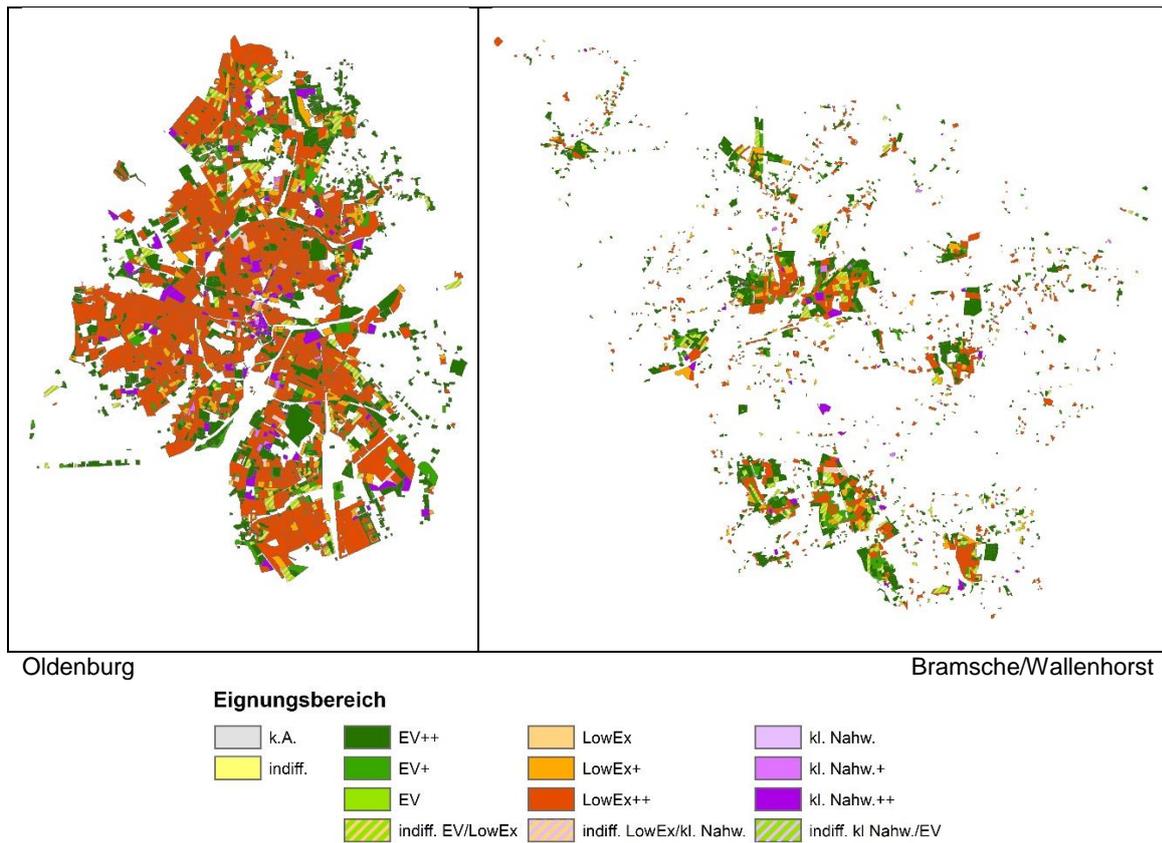


Abb. 2: Baublockanalyse Status Quo (unmaßstäblich, Baublockgeometrien der microm Micromarketing-Systeme und Consult GmbH (Neuss))

Analog zur Publikation P 4, in der die Szenarien- und rasterbasierte Abfolge von Änderungen der Eignungsbereiche in Bramsche/Wallenhorst dargestellt wird, stellt die folgende Abb. 3 dies für Oldenburg dar.

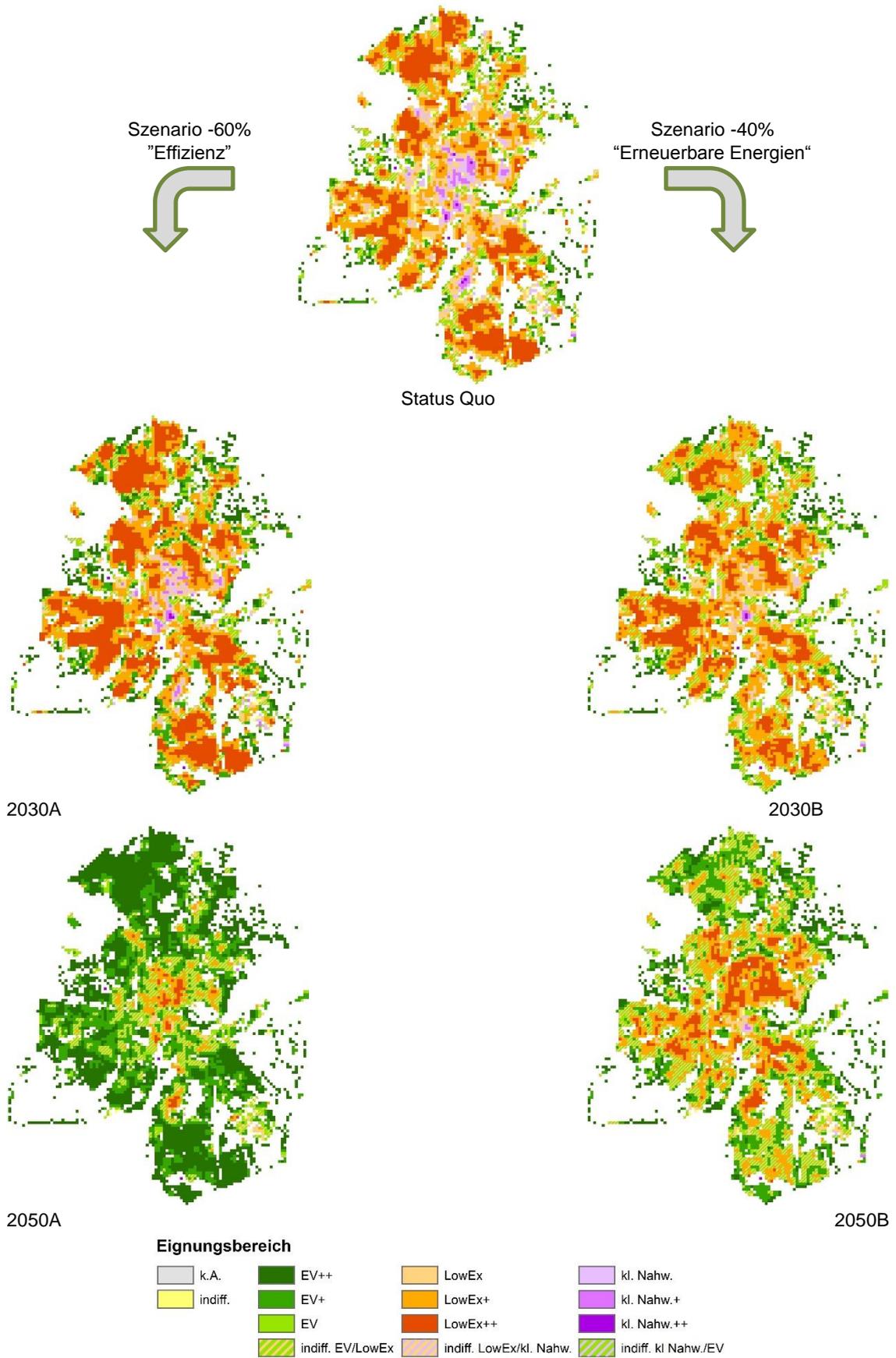
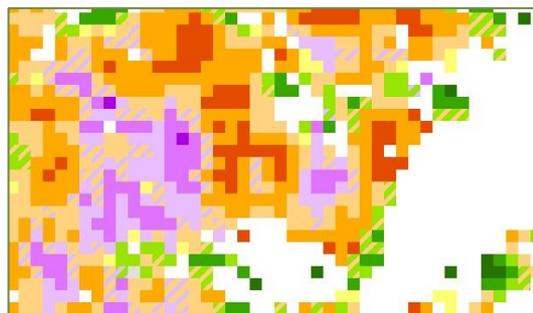


Abb. 3: Rasteranalyse Oldenburg (Szenarien)

Um die Unterschiedlichkeit visuell zu verdeutlichen, erfolgt in Ausschnitten ein Vergleich zwischen Baublock- und Rasteranalyseergebnisse für Oldenburg (Abb. 4) und für Bramsche/Wallenhorst (Abb. 5).



Raster Oldenburg

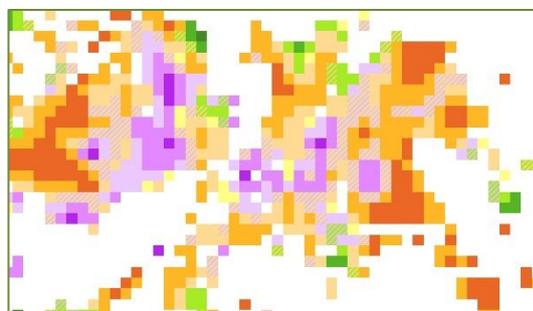


Baublock Oldenburg



Überlagerung Baublock auf Raster Oldenburg

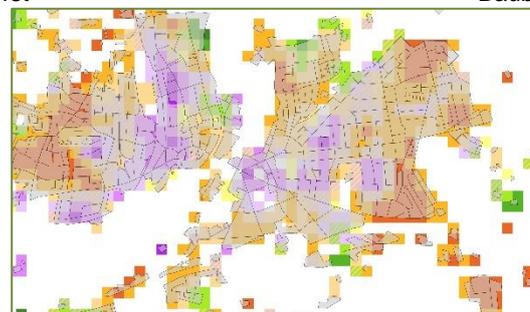
Abb. 4: Raster- und Baublockvergleich Status Quo Oldenburg (deckungsgleicher Ausschnitt, unmaßstäblich)



Raster Bramsche / Wallenhorst



Baublock Bramsche / Wallenhorst



Überlagerung

Abb. 5: Raster- und Baublockvergleich Status Quo Bramsche / Wallenhorst (deckungsgleicher Ausschnitt, unmaßstäblich)

Die statistischen und landschaftsmetrischen Analysen und Vergleiche sind in den nachfolgenden Kapiteln zu finden.

4.4 Räumlicher Vergleich Baublock / Raster

Um die beiden räumlichen Konzepte hinsichtlich der Eignungsbereiche vergleichen zu können, wird die räumliche Übereinstimmung untersucht.

Hier kommt es allerdings zu einer grundsätzlichen Problematik, die eine Interpretation der Ergebnisse erschwert. Die Baublockebene zielt auf eine diskrete Grenzziehung ab, wohingegen der Rasteransatz eine kontinuierliche Verteilung der Eignungsklassen ermöglicht. Zunächst muss daher der Aspekt der räumlichen Auflösung für eine vergleichende Analyse geklärt werden, da die Baublöcke in Rasterzellen konvertiert werden müssen.

Allerdings zeichnen sich v. a. in Bramsche / Wallenhorst in einigen Bereichen grundsätzliche Unterschiede ab, die durch die unterschiedlichen Herangehensweisen bei der Ableitung der Eignungsbereiche bedingt scheinen. Die folgende Abbildung zeigt einen Ortsrand von Bramsche.



Abb. 6: Vergleich Raster / Baublock – Ortsrand Bramsche (unmaßstäblich, dargestellt auf Luftbilddaten von Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, GIS User Community)

Die fehlende Übereinstimmung in dem Bereich weist daraufhin, dass es einen systematischen Unterschied zwischen den Herangehensweisen gibt.

4.4.1 Räumliche Auflösung

Zusätzlich stellt sich die Frage, mit welcher Auflösung die Umwandlung der Baublöcke in Rasterzellen erfolgen sollte. Die Problematik besteht darin, dass Ergebnisse miteinander verglichen werden, die auf Grundlage sehr unterschiedlicher räumlicher Konzeptualisierungen (s. Kap. 2.1 und Kap. 3.2) entstanden sind. Über einen Vergleich der Flächenausprägungen und räumlichen Übereinstimmung der jeweiligen Eignungen kann eine Aussage über die inhaltliche Deckungsgleichheit getroffen werden, wobei die Vektordaten in Rasterdaten konvertiert und die Eignung der jeweils größten Flächenanteile der Rasterzelle zugeordnet werden. Dabei kommt die grundsätzliche Problematik der Granularität zum Tragen. Bei Zacharias [64] liegt z. B. die mittlere Weite der Polygone weit über der Auflösung der Rasterdaten, sodass keine räumliche Anpassung erforderlich ist. Die Baublöcke hingegen weisen teilweise eine viel geringere räumliche Ausdehnung auf, die nah an die räumliche Auflösung der Rasterzellen heranreicht und somit besonders problematisch wird.

Mit Hilfe der Berechnung von Envelopes für jeden Baublock wird die mittlere Ausdehnung der Baublöcke in Ost-West und Nord-Süd-Ausrichtung bestimmt. In Oldenburg beträgt die mittlere Länge ca. 172 m (Std.-Abweichung 107m) in Nord-Süd-Richtung und in Ost-West - Richtung ca. 170 m (Std.-Abweichung 105 m). In Bramsche / Wallenhorst beträgt die mittlere Länge ca. 134 m (Std.-Abweichung ca. 87 m) in Nord-Süd-Richtung und in Ost-West - Richtung ca. 122 m (Std.-Abweichung ca. 90 m).

Abb. 7 und Abb. 8 zeigen die jeweiligen Histogramme der Envelope-Kantenlängen. Die größte Klasse ist bei 100 m bzw. 125 m. Um die Inhalte in die Rasterwelt dem Analysemaßstab adäquat anzupassen, muss eine Auflösung unterhalb 100 m gefunden werden. Wallemacq et al. [65] setzen eine Auflösung von 10 m an, um vektorielle Baublöcke in Raster umzuwandeln. Allerdings ist dieses Vorgehen mit der Problematik einer Pseudogenauigkeit versehen, da damit durchaus Bereiche miteinander verglichen werden, in denen sich keine Gebäude befinden. Aus diesem Grund und um den Effekt der Granularität zu reduzieren, wird in dieser Arbeit das Analyseraster iterativ von 100 x 100 m auf 25 x 25 m heruntergesetzt.

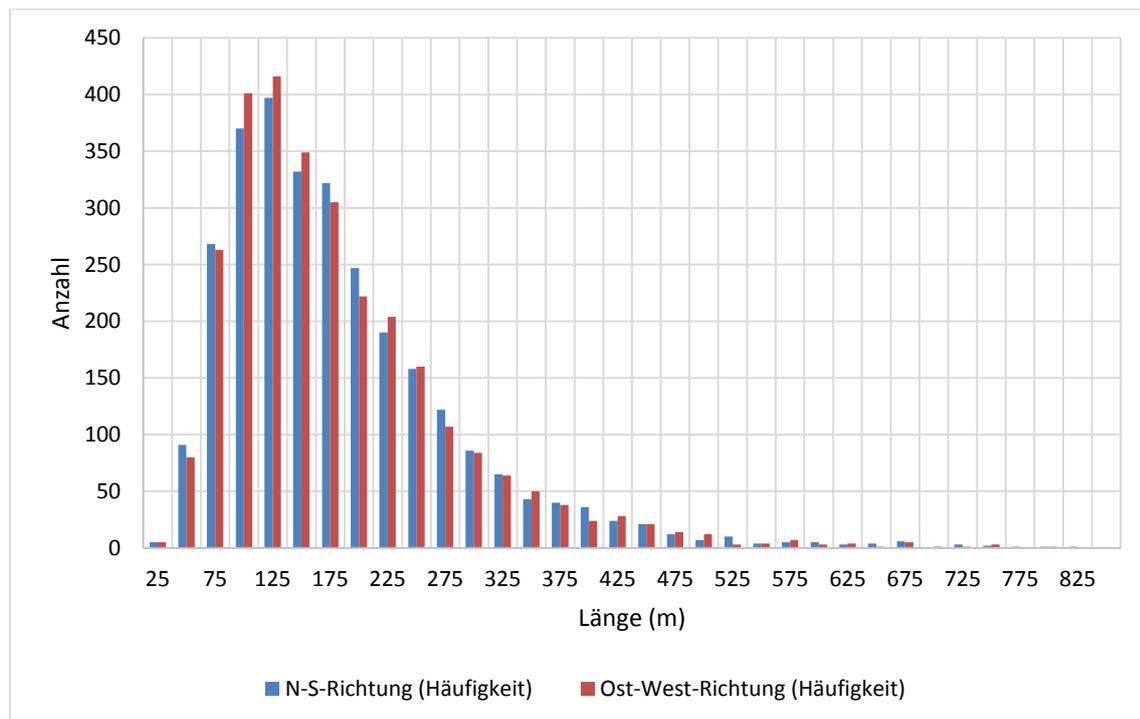


Abb. 7: Histogramm der Baublock – Envelope - Längen (25m-Schritte) in Oldenburg

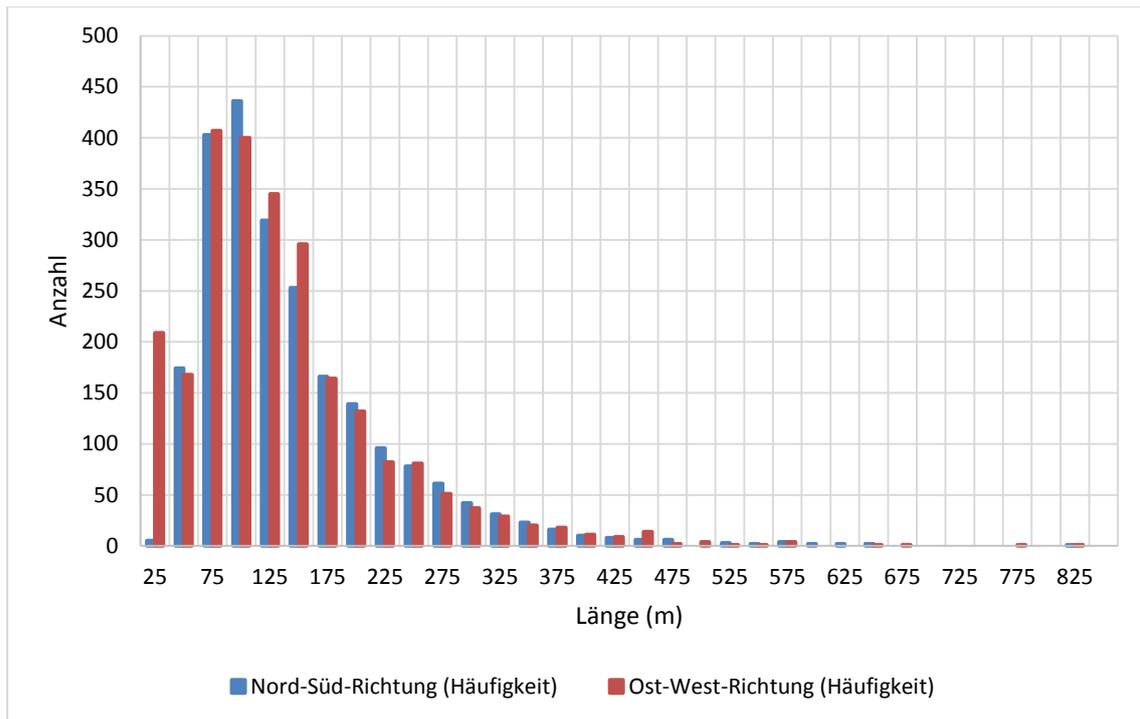


Abb. 8: Histogramm der Baublock - Envelope -Längen (25m-Schritte) in Bramsche/Wallenhorst

4.4.2 Vergleich

Für den Vergleich werden die jeweiligen Eignungsklassen zu Gruppen zusammengefasst und diese miteinander in ihrer räumlichen Übereinstimmung verglichen. Der Grund für die Zusammenfassung liegt darin, dass ansonsten eine zu große Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten besteht, die eine Interpretation erschweren würde. Dabei wird nicht zwischen den Klassen innerhalb der Klassengruppen unterschieden. So werden z. B. die Klassen 1, 2 und 3 auf Rasterebene für die Klassengruppe Einzelversorgung zusammengefasst und mit den Klassen 1 und 2 der Baublockebene, die ebenfalls zusammengefasst werden, verglichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei den Baublöcken die Eignungsklassen 3, 10 und 100 fehlen.

Die folgenden Abbildungen sind wie folgt zu verstehen: Auf der x-Achse sind die Eignungsklassengruppen der Rasterebene eingetragen, auf der y-Achse der Grad der Übereinstimmung in % mit den Klassengruppen der Baublockebene.

Der Abb. 9 kann beispielsweise entnommen werden, dass die Klassengruppe Einzelversorgung auf Rasterebene zu 44% NoData und zu 25 % der Klassengruppe Einzelversorgung auf Baublockebene entspricht.

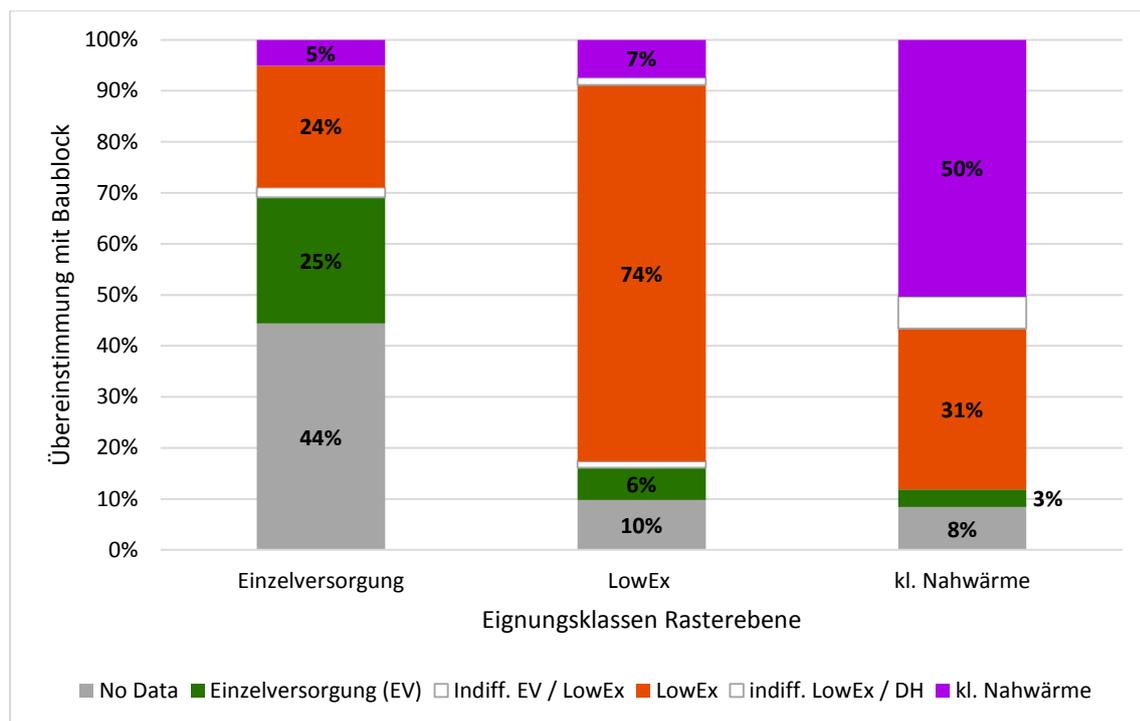


Abb. 9: Grad der Übereinstimmung von Raster zu Baublock in Oldenburg

In Oldenburg fällt auf, dass es eine hohe Übereinstimmung von LowEx und kl. Nahwärme gibt, während bei Einzelversorgung der größte Teil in NoData - Bereiche auf Baublockebene fällt.

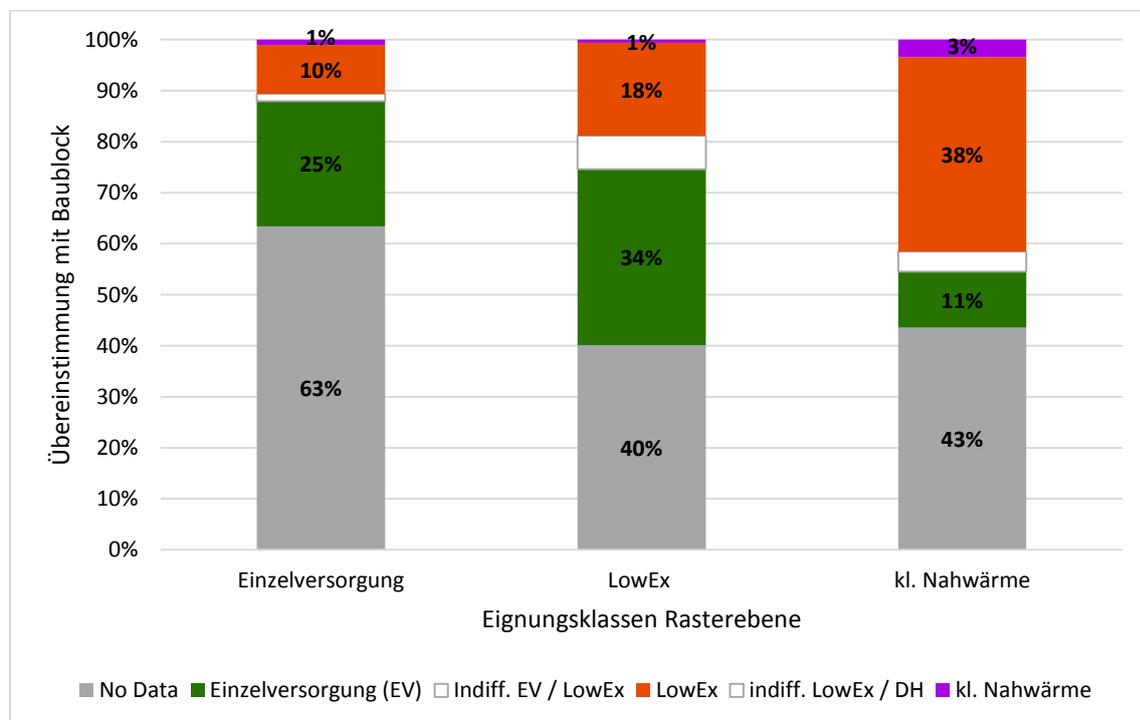


Abb. 10: Grad der Übereinstimmung von Raster zu Baublock in Bramsche/Wallenhorst

In Bramsche/Wallenhorst ist der NoData-Anteil durchgehend sehr hoch und die Übereinstimmungen insgesamt nicht sehr ausgeprägt.

4.4.3 Diskussion und Zwischenfazit

Die NoData-Anteile können als Hinweis auf lockere Siedlungsstrukturen gedeutet werden. Auffallend ist in beiden Fällen der hohe Anteil bei der Einzelversorgung, die meist im peripheren Bereich vertreten ist. Auch der Unterschied zwischen Oldenburg und Bramsche/Wallenhorst in den übrigen Bereichen ist der Siedlungsstruktur geschuldet (s.a. Kap. 4.6.1: Analyse von Landschaftsmetriken). Größere, zusammenhängende Bereiche in Oldenburg führen zu höheren Übereinstimmungen bei LowEx und kl. Nahwärme.

Allerdings muss festgehalten werden, dass ein direkter Vergleich an Grenzen stößt, da Baublock und Rasterzelle auf sehr unterschiedlichen räumlichen Konzeptualisierungen und Herangehensweisen bei der Ermittlung der Eignungsbereiche fußen (s. a. Kap. 3.4). So kann es durchaus sein, dass keine „echten“, sondern nur modellbedingte Unterschiede aufgezeigt werden, die im Zuge einer Detailplanung wieder nivelliert werden könnten.

Der **These F1-T1**, wonach die Eignungsbereiche in der Raster- als auch in der Polygonwelt weitestgehend deckungsgleich seien, kann nicht im vollen Umfang zugestimmt werden. Neben den sehr unterschiedlichen Herangehensweisen sind offensichtlich Siedlungsstrukturen und die Größe der Eignungsbereiche entscheidend.

Der **Hypothese F1-H1** („Je größer und zusammenhängender Eignungsbereiche sind, desto größer ist auch der Grad der Übereinstimmung zwischen Baublock- und Rasterergebnis.“) wird durch den relativ hohen Grad an Übereinstimmung in Oldenburg belegt und wird durch die Landschaftsmetriken untermauert (s. Kap. 4.6.1).

Es kann ein Zusammenhang zwischen feingliedriger Siedlungsstruktur und einer starken Abweichung bei der Übereinstimmung angenommen werden (**Hypothese F1-H2**: „Je kleinteiliger die Siedlungsstruktur ist, desto stärker weicht die Übereinstimmung zwischen Raster- und Polygonbereichen ab.“), dem in Kap. 4.6 (Landschaftsmetriken) weiter nachgegangen wird. Fraglich ist allerdings, wie sehr diese Beobachtung durch die räumliche Auflösung bei der Konvertierung von Polygon- in die Rasterwelt und auf Grund der grundsätzlichen Herangehensweise beeinflusst wird. Die Modellierung der Netzlänge in der Polygonwelt stellt eine besondere Herausforderung dar. Mit der Wahl der Baublöcke nähert sich die Modellierung einer Detailplanung, die mit einer überschlägigen Abschätzung nicht erreicht werden kann. Somit wird hier eine entscheidende Modellierungsgrenze erreicht und ein direkter Vergleich ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Der Rasteransatz hingegen erlaubt es, die Versorgungsoptionen und deren Übergänge sehr differenziert abzubilden, die durch die Größe der Baublöcke nicht ausreichend differenziert werden.

Der Vergleich verdeutlicht auch, dass die Wahl des räumlichen Konzepts sehr entscheidend ist und in der Folge auch nicht mehr geändert werden kann bzw. Daten aus einer anderen Konzeption nicht ohne weiteres integriert werden können.

4.5 Charakterisierung der Eignungsbereiche mittels der Wärmebedarfe und Wärmelinien-dichte

Die Eignungsbereiche resultieren aus der räumlichen Prozessierung der Wärmelinien-dichte und Zuordnung gemäß der Fuzzy Membership und der jeweils stärksten Ausprägung (s. P 4)

Um nun festzustellen, inwieweit die Eignungsbereiche mit hohen absoluten Wärmebedarfen bzw. mit Wärmelinieindichten korrespondieren, wird neben der Verteilung auch auf Unterschiede zwischen den Werten in den jeweiligen Eignungsbereichen getestet. Dies erfolgt sowohl für die Rasteranalyse als auch für die Analyse auf Baublockebene.

Hierzu wird folgenden statistischen Hypothesen nachgegangen:

- F2-H1: Die Eignungsbereiche unterscheiden sich nicht statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmebedarfe (**Nullhypothese F2-H1-H0**).
Die Eignungsbereiche unterscheiden sich statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmebedarfe (**Alternativhypothese F2-H1-H1**).
- F2-H2: Die Eignungsbereiche unterscheiden sich nicht statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmelinieindichte (**Nullhypothese F2-H2-H0**).
Die Eignungsbereiche unterscheiden sich statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmelinieindichte (**Alternativhypothese F2-H2-H1**).

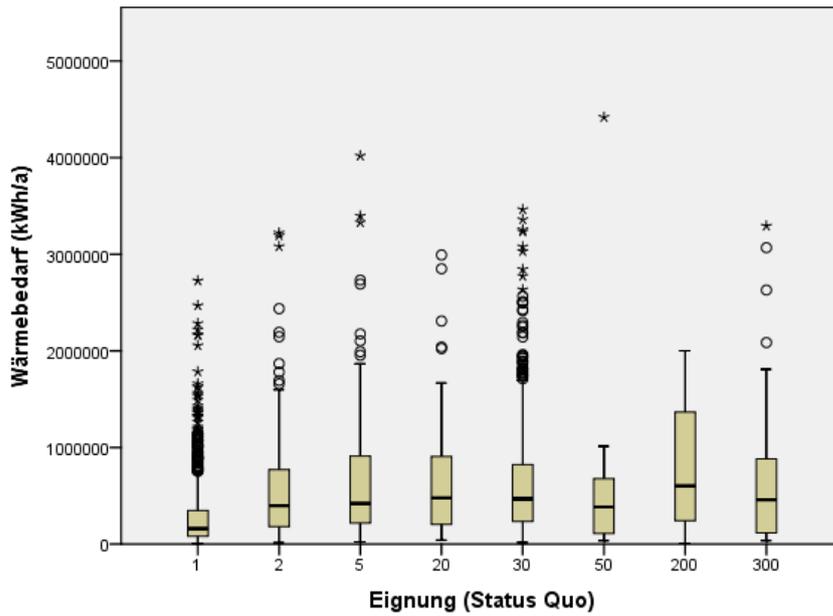
Zunächst erfolgt die Überprüfung auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test, um die passende Testmethode auszuwählen. Ein Großteil der Werteverteilung innerhalb der Eignungsbereiche folgt nicht einer Normalverteilung, sodass z. B. ein t-Test nicht in Frage kommt. Für die weitere Analyse wird der Kruskal-Wallis-Test herangezogen, der sehr robust gegenüber nicht-normalverteilten Datensätzen und Ausreißern ist [66, p. 283]. Er vergleicht die Ränge unter den Gruppen und zeigt einen asymptotischen Signifikanzwert im Test an [66, p. 306].

Die Nullhypothese besagt in dem Test, dass keine Unterschiede zwischen den Gruppen (hier: Eignungsbereichen) bestehen. Wenn die asymptotische Signifikanz bei einer Stichprobenzahl von $n > 30$ unter einem zuvor definierten Wert (hier: 0,05) liegt, muss diese Hypothese verworfen werden, d.h. in dem Fall liegen Unterschiede vor.

Auf Grund der Vielzahl der erforderlichen paarweisen Tests auf signifikante Unterschiede der Wärmebedarfe und Wärmelinieindichten in den jeweiligen Eignungsklassen wird aus Gründen der Lesbarkeit darauf verzichtet, jeden einzelnen Test hier aufzuführen. Die Testergebnisse werden tabellarisch im Anhang A 2 aufgeführt.

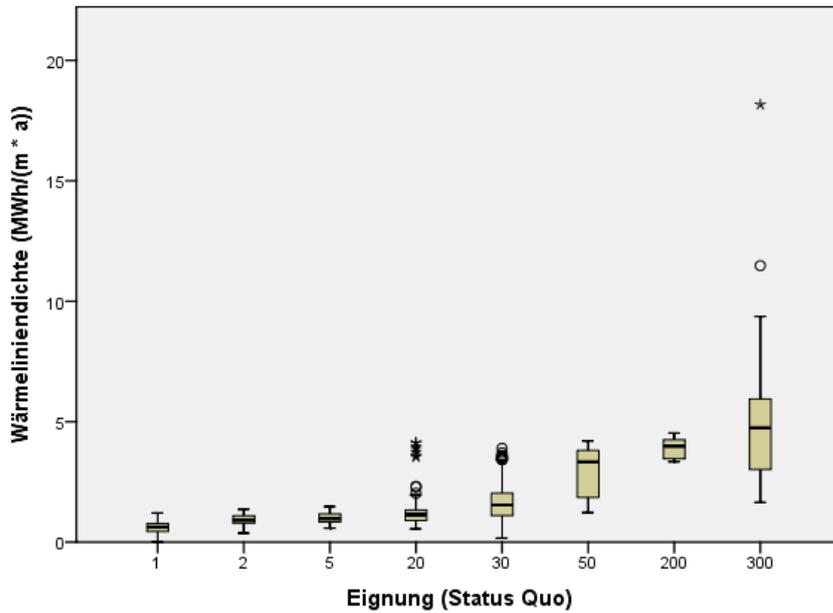
Im Folgenden werden die Plots dargestellt und kurz aufgeführt, in welchen Fällen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

4.5.1 Bramsche / Wallenhorst



Hinweis: Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eignungsklassen, außer bei der Eignungsklasse 1 zu allen weiteren.

Abb. 11: Kruskal-Wallis-Test Wärmebedarf auf Baublockebene (Bramsche/Wallenhorst)

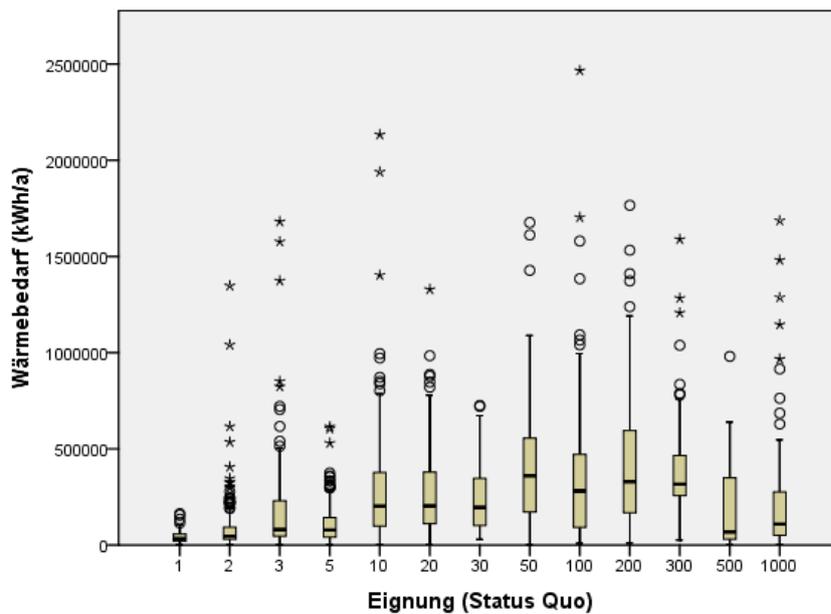


Hinweis: Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eignungsbereichen:

- 2/5
- 50/300
- 50/200
- 200/300

Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen signifikante Unterschiede auf.

Abb. 12: Kruskal-Wallis-Test Wärmeliniendichte auf Baublockebene (Bramsche/Wallenhorst)

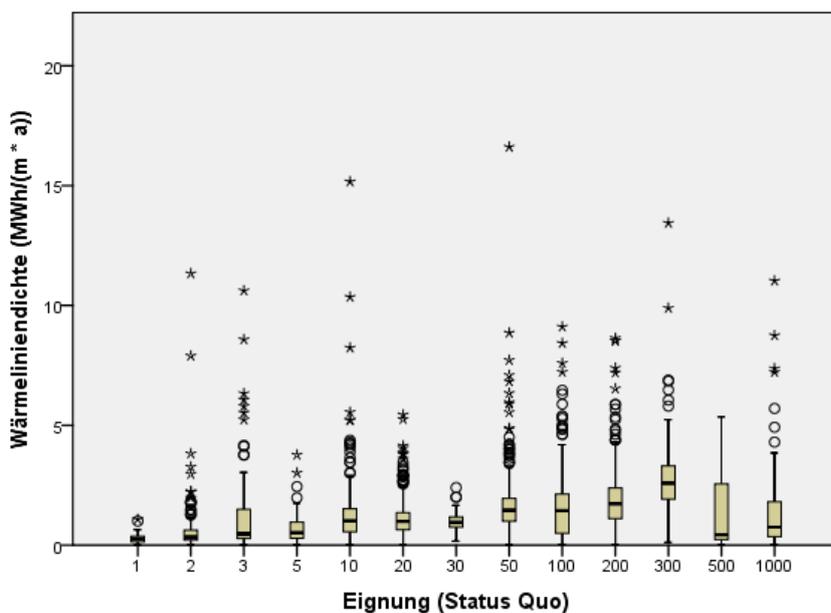


Hinweis: Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eignungsbereichen:

- 2/5
- 3/500
- 500/1000
- 30/10
- 30/20
- 10/20
- 200/50
- 200/300
- 50/300

Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen signifikante Unterschiede auf.

Abb. 13: Kruskal-Wallis-Test Wärmebedarf auf Rasterebene (Bramsche/Wallenhorst)



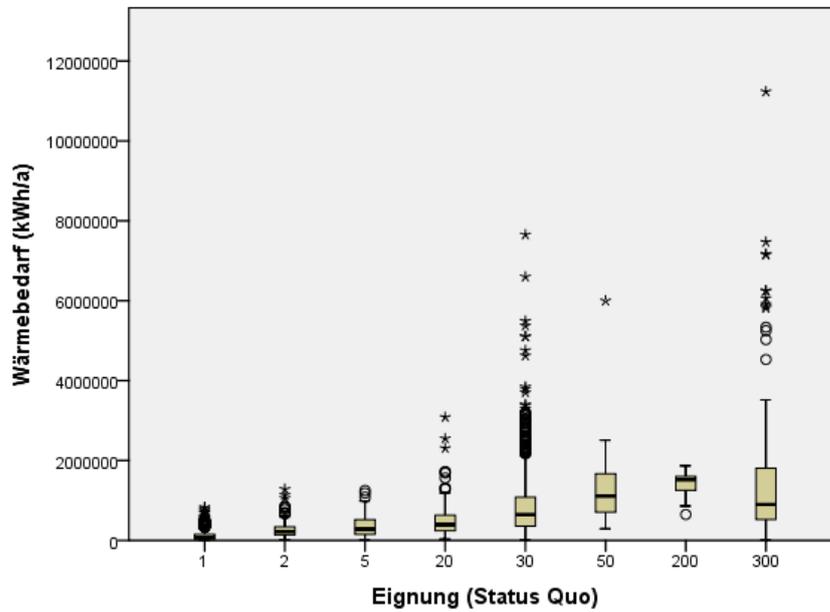
Hinweis: es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eignungsbereichen:

- 2/5
- 1000/30
- 1000/500
- 1000/20
- 1000/10
- 30/500
- 30/20
- 30/10
- 500/20
- 500/10
- 20/10

Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen signifikante Unterschiede auf.

Abb. 14: Kruskal-Wallis-Test Wärmeliendichte auf Rasterebene (Bramsche/Wallenhorst)

4.5.2 Oldenburg

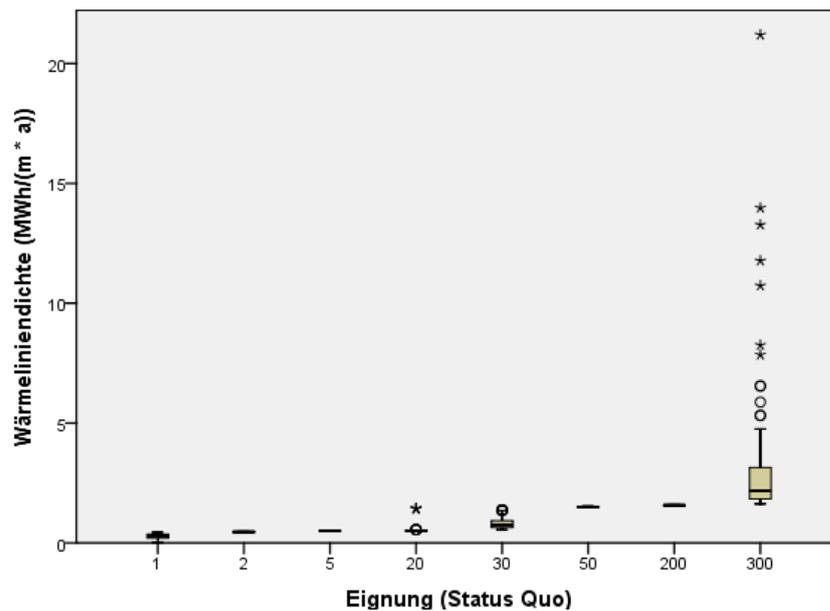


Hinweis: Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eignungsbereichen:

- 300/50
- 300/200
- 50/200

Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen signifikante Unterschiede auf.

Abb. 15: Kruskal-Wallis-Test Wärmebedarf auf Baublockebene (Oldenburg)

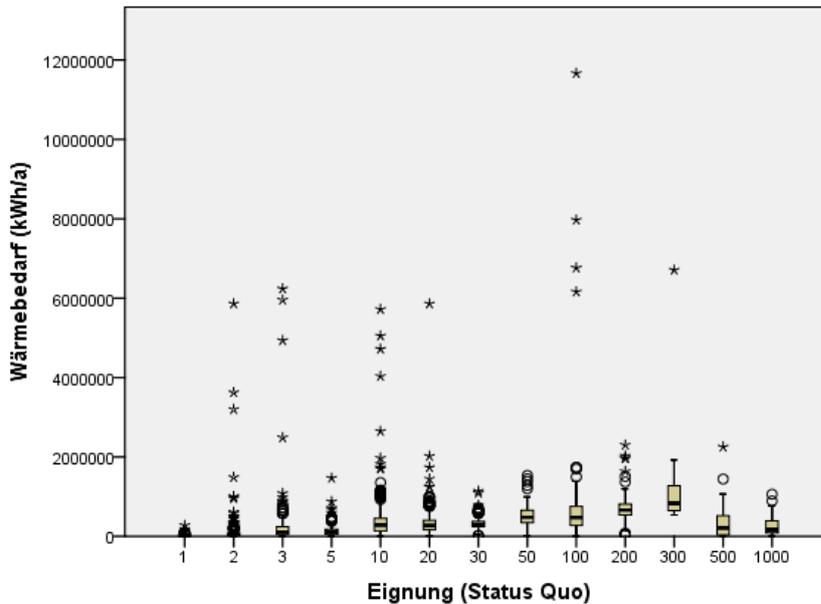


Hinweis: Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eignungsbereichen:

- 5/20
- 50/200
- 50/300
- 200/300

Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen signifikante Unterschiede auf

Abb. 16: Kruskal-Wallis-Test Wärmeliniendichte auf Baublockebene (Oldenburg)

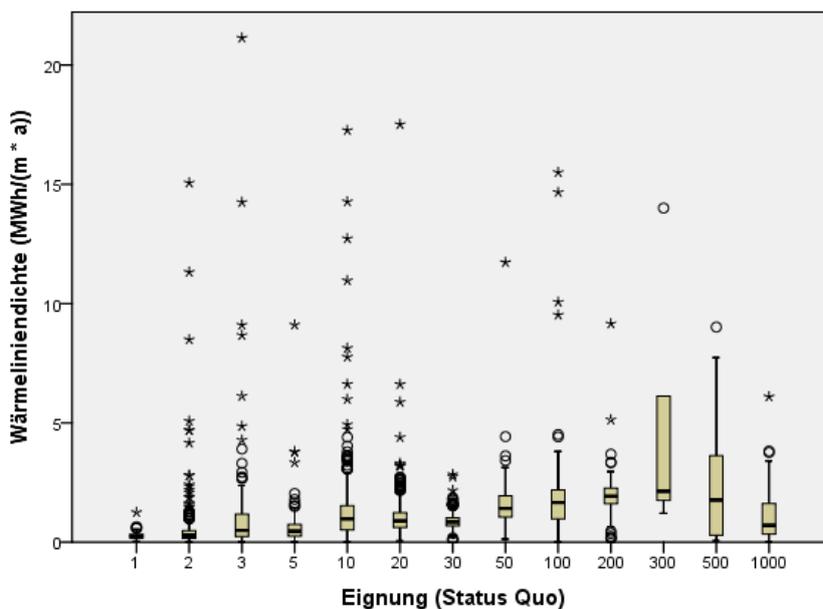


Hinweis: Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eignungsbereichen:

- 1000/500
- 500/20
- 500/10
- 20/10
- 100/50
- 50/300

Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen signifikante Unterschiede auf.

Abb. 17: Kruskal-Wallis-Test Wärmebedarf auf Rasterebene (Oldenburg)



Hinweis: Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eignungsbereichen:

- 1000/30
- 1000/20
- 1000/500
- 30/20
- 30/500
- 20/500
- 20/10
- 500/10
- 100/50
- 50/300
- 200/300

Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen signifikante Unterschiede auf.

Abb. 18: Kruskal-Wallis-Test Wärmedichtelinie auf Rasterebene (Oldenburg)

4.5.3 Diskussion und Zwischenfazit

Zunächst ist festzustellen, dass in der Regel keine signifikanten Unterschiede zwischen den indifferenten Eignungsklassen (5, 50, 500, 1000) und den übrigen Eignungsklassen vorliegen. Dies bestätigt die Rolle der indifferenten Bereiche als räumliche Mittler zwischen den Eignungsbereichen. Somit kann festgehalten werden, dass die räumliche Konfiguration der indifferenten Bereiche zum Tragen kommt und zwischen den Eignungsbereichen vermittelt.

Vereinzel liegen keine signifikanten Unterschiede innerhalb von Klassengruppen (z. B. innerhalb der LowEx – Gruppe (10, 20, 30)) vor. Allerdings kann durchweg beobachtet

werden, dass signifikante Unterschiede zwischen den Klassen der jeweiligen Klassengruppen vorliegen, d. h. die Klassengruppe LowEx unterscheidet sich signifikant von der Klassengruppe Einzelversorgung hinsichtlich Wärmebedarf und Wärmelinienendichte. Somit kann festgehalten werden, dass die Klassenbildung nachvollziehbar ist und robust gegenüber den räumlichen Glättungsprozessen bei der Ableitung der Eignungsbereiche ist.

Allerdings fällt auf, dass bei den Rasterdaten die Anzahl der nicht signifikanten Unterschiede innerhalb der Klassengruppen höher ausfällt als bei den Baublöcken, was ggf. auf die Problematik der räumlichen Auflösung schließen lässt. Ein direkter Vergleich ist allerdings problematisch, da bei der Baublockanalyse die Eignungsbereiche 3, 10 und 100 fehlen. Sie bilden die jeweils schwächste Ausprägung der jeweiligen Klassengruppen ab. Dies kann als ein Hinweis gedeutet werden, dass die Fuzzy Membership Methode auf Ebene der Baublöcke zu grob, bzw. die räumliche Auflösung keine allzu feine Differenzierung zulässt.

Interessant ist die Verteilung des Wärmebedarfs bei der Baublockanalyse für Bramsche/Wallenhorst. Nahezu alle Eignungsbereiche weisen keine signifikanten Unterschiede auf, bis auf die Eignung 1 (Einzelversorgung ++). Die übrigen Bereiche differenzieren sich erst durch die Hinzunahme der modellierten Leitungslängen, was die besondere Bedeutung dieses Aspekts unterstreicht.

Somit können auf Rasterebene die **Alternativhypothese F2-H1-H1** („Die Eignungsbereiche unterscheiden sich statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmebedarfe.“) und die **Alternativhypothese F2-H2-H1** („Die Eignungsbereiche unterscheiden sich statistisch signifikant hinsichtlich ihrer Wärmelinienendichte.“) weitestgehend bestätigt werden. Die Hinzunahme der Leitungslänge wirkt sich nur gering auf die Aussage aus, was die Modellierung der Wärmelinienendichte und der Linienlänge wiederum untermauert.

Die Ausnahmen liefern wichtige Hinweise für die Einordnung weiterer Ergebnisse.

4.6 Szenarioanalyse

Die Entwicklung von Szenarien hinsichtlich der Reduktion des Wärmebedarfs wird ausführlich in den Publikationen vorgestellt. Vorgabe waren die Reduktionsziele des Klimaschutzplans der Bundesregierung und deren Konkretisierung für Gebäude [9]. Der Reduktionskorridor zeigt ein Minimal- und ein Maximalreduktionsziel bis 2050 auf. Da sowohl englisch- als auch deutschsprachig publiziert wurde, erfolgt an dieser Stelle eine Einordnung hinsichtlich der Benennung der jeweiligen Szenarien:

Tab. 7: Bezeichnung der Szenarien in unterschiedlichen Publikationen

	Ziel nach [9]	Bezeichnung nach [9]	Bezeichnung in P 2	Bezeichnung in P 3 - P 5
Maximalszenario	- 60 %	Effizienz	Efficiency (E)	A
Minimalszenario	- 40 %	Erneuerbare Energien	Renewable Heating (RH)	B

In der Arbeit werden die Bezeichnungen A und B verwendet, d. h. das Szenario 2050 A beschreibt die Reduktion des Wärmebedarfs im Gebäudebestand um 60 % im Jahre 2050. Die Reduktion wird jedem Gebäude zugeordnet und die Eignungsbereiche werden erneut berechnet.

Mit Hilfe von Landschaftsmetriken (Kap. 4.6.1) und Hotspot - Analyse (Kap. 4.6.2) können Änderungen in der räumlichen Konfiguration vor dem Hintergrund der Szenarien im Zeitverlauf beschrieben und Zusammenhänge analysiert werden.

4.6.1 Analyse von Landschaftsmetriken

Die Stärke eines rasterbasierten Ansatzes liegt in der Möglichkeit, räumliche Gradienten und deren Entwicklung unter Veränderung von Rahmenbedingungen (Szenarien) entlang einer Zeitachse aufzuzeigen.

Die Definition und Berechnung der Szenarien werden in den Publikationen P 2 und P 4 (s. Anhang A 3) beschrieben. Dieses Kapitel befasst sich mit der Frage, mit welchen Metriken die Szenarien in ihrer räumlichen Ausprägung analysiert werden können. Räumliche Metriken können zum einen auf Landschaftsebene und zum anderen auf Klassenebene herangezogen werden, um einfache Aspekte wie Flächenanteile oder auch komplexe Aspekte wie die räumliche Aggregation von Bereichen beschreiben zu können. Die Ebenen werden im Folgenden definiert.

Für die Analyse der Metriken wird Fragstat 4.2 [67] verwendet, welches ursprünglich für landschaftsökologische Fragestellungen entwickelt wurde, wobei die Metriken z. B. auch im stadtplanerischen Kontext eingesetzt werden [68]. Auf Grund des Softwareursprungs wird bei der Analyse von folgenden Ebenen gesprochen:

1. Patch: Die konkrete Rasterzelle
2. Klassen: Gesamtheit aller Patches eines Typs
3. Landschaft: Summe aller Klassen

Metriken können für einzelne Patches, die aus mehreren Zellen eines Typs bestehen können, für Klassen (Typen von Patches) und für die gesamte (Stadt-)Landschaft berechnet werden. Die einzelnen Patches werden in dieser Ausarbeitung nicht weiter betrachtet, da keine Einzelbetrachtung, z. B. eines Quartiers, sondern die Charakterisierung des gesamten Stadtgebietes vorgenommen wird.

Der in der **These F2-T2** postulierte szenarienbedingte Wandel kann über die Veränderung von Metriken beschrieben werden, die auf Landschafts- und auf Klassenebene räumliche Konfigurationen abbilden. Zur Untersuchung der **Hypothese F2-H3** („Je stärker die Reduktion des Wärmebedarfs über die Zeit ausfällt, desto geringer wird die räumliche Variabilität der Siedlungsstruktur bezogen auf Eignungsbereiche.“) werden die Metriken der Landschaftsebene ausgewählt (s. Tab. 8). Zur Untersuchung der **Hypothese F2-H4** („Je stärker die Reduktion des Wärmebedarfs über die Zeit ausfällt, desto geringer wird die räumliche Variabilität bezogen auf Eignungsbereiche mit geringer Wärmelinienlänge.“) werden die Metriken der Klassenebene ausgewählt (s. Tab. 9). Um den Effekt der Gesamtsiedlungsstruktur auf die Ergebnisse abzuschätzen erfolgt zuvor eine Charakterisierung der untersuchten Städte in Kap. 4.6.1.1.

Tab. 8: Verwendete Metriken auf Landschaftsebene, s.a. [67]

Metrik	Beschreibung
Contagion (CONTAG)	CONTAG basiert auf der Wahrscheinlichkeit, den Zelltyp I neben dem Zelltyp j zu finden. Der Index berücksichtigt die Nachbarschaft der Zellen, nicht die der Patch-Nachbarschaften, und besteht aus der Summe, über Patch-Typen, des Produkts zweier Wahrscheinlichkeiten: (1) Die Wahrscheinlichkeit, dass eine zufällig ausgewählte Zelle zur Klasse i gehört (auf Grund des Anteils von Klasse i) und (2) die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass eine Nachbarschaftszelle, direkt neben der Zelle der Klasse i, zur Klasse j gehört. Hohe Werte zeigen an, dass wenige, große Patches mit gleicher Nachbarschaft vorliegen und geringe Werte zeigen an, dass viele, kleine Patches vorliegen
Landscape Shape Index (LSI)	LSI beschreibt das Umfang-zu-Fläche - Verhältnis für die Patches in der Landschaft insgesamt. Je größer der LSI – Wert, desto verteilter sind die Patches im Raum.
Patch Density (PD)	PD beschreibt die Anzahl der Patches pro 100 ha. Auf Landschaftsebene können so auch unterschiedlich große Untersuchungsgebiete wie Oldenburg und Bramsche/Wallenhorst miteinander verglichen werden. Mit PD können allerdings keine Aussagen über Größe und Verteilung der Patches getroffen werden.

Für die Untersuchung auf Klassenebene werden folgende Metriken herangezogen:

Tab. 9: Verwendete Metriken auf Klassenebene, s.a. [67]

Metrik	Beschreibung
Percentage of Landscape (PLAND)	PLAND beschreibt den Anteil der Klasse in der (Stadt-)Landschaft und gibt einen wichtigen Hinweis auf die Gesamtkomposition und deren mögliche, szenarienbedingte Veränderung.
Edge Density (ED)	ED berechnet die Kantenlänge der Klassen im Verhältnis zur Flächengröße (m/ha); allerdings erfolgt in diesem Fall die Berechnung nur für die Binnendifferenzierung, die Außengrenzen der Landschaft werden nicht berücksichtigt.
normalized Landscape Shape Index (nLSI)	nLSI fußt ebenfalls auf den Kantenlängen der Klassen und setzt diese in Verhältnis zur jeweiligen Flächengröße. Zusätzlich findet eine Normalisierung zwischen den Maximum- und Minimumwerten der Kantenlängen statt ($0 \leq nLSI \leq 1$). Je größer der Wert ist, desto höher ist der Grad der Disaggregation der Klasse.

Bevor auf die Metrikanalyse auf Landschafts- und auf Klassenebene im Einzelnen eingegangen wird, erfolgt zunächst eine Analyse der Gesamtsiedlungsstruktur.

4.6.1.1 Vergleich der Städte

Oldenburg auf der einen Seite und Bramsche/Wallenhorst auf der anderen Seite repräsentieren Groß- und Mittelstädte mit einer typischen Siedlungsstruktur. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Einwohnerdichte und in der Verzahnung der Siedlungsflächen mit dem Umland. Während Oldenburg eine relativ durchgehende Bebauung aufweist, weisen Bramsche und Wallenhorst eine sehr starke Verzahnung mit dem Umland auf. Die Einwohnerdichte allerdings ist sehr stark vom Raumbezug abhängig.

Tab. 10 zeigt die Einwohnerdichten der untersuchten Städte bezogen auf unterschiedliche Raumbezüge (Gesamtfläche, Raster, Baublock) auf.

Tab. 10: Einwohnerdichte der untersuchten Städte bezogen auf unterschiedliche Raumbezüge (Gesamtfläche, Raster, Baublock)

Stadt/Gemeinde	Gesamtfläche in qkm (LSN)	Einw. je qkm (LSN)	Rasterfläche in qkm	Einw. je qkm Rasterfläche	Baublockfläche in qkm	Einw. je qkm Baublock
Oldenburg	103,09	1607,4	56,50 qkm	2932,94	50,25 qkm	3297,73
Bramsche/Wallenhorst	230,56	235,23	42,70 qkm	1270,14	26,25 qkm	2066,09

Die Flächengröße des Stadtgebiets von Bramsche/Wallenhorst führt zu einer sehr geringen Einwohnerdichte. Werden aber andere Raumbezüge herangezogen, relativieren sich die Unterschiede zu Oldenburg. Auffallend ist der sehr große Unterschied der Gesamtfläche zu den übrigen Raumbezügen, was verdeutlicht, dass Bramsche und Wallenhorst in eine ländliche Struktur eingebettet sind.

Um einen Vergleich der Siedlungsgrobstrukturen mit Hilfe von Landschaftsmetriken vorzunehmen, werden die Rasterzellen nicht weiter differenziert und einem Wert zugeordnet. In Bramsche/Wallenhorst liegt der LSI Wert bei 24,65 und in Oldenburg bei 11,62. Dies kann als Hinweis interpretiert werden, dass die Verzahnung mit dem Umland in Bramsche/Wallenhorst stärker ausgeprägt ist und den visuellen Eindruck in Kap. 4.3 bestätigt. Auch die ED bezogen auf die gesamte Siedlungsfläche ist bei Bramsche/Wallenhorst mit 151 m/ha mehr als doppelt so hoch als in Oldenburg mit 62,12 m/ha.

4.6.1.2 Metrikauswertung auf Landschaftsebene

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Patch Density Analyse (PD) (Abb. 19), des Landscape Shape Index (LSI) (Abb. 20), sowie der Contagious Probability (CONTAG) (Abb. 21) dargestellt.

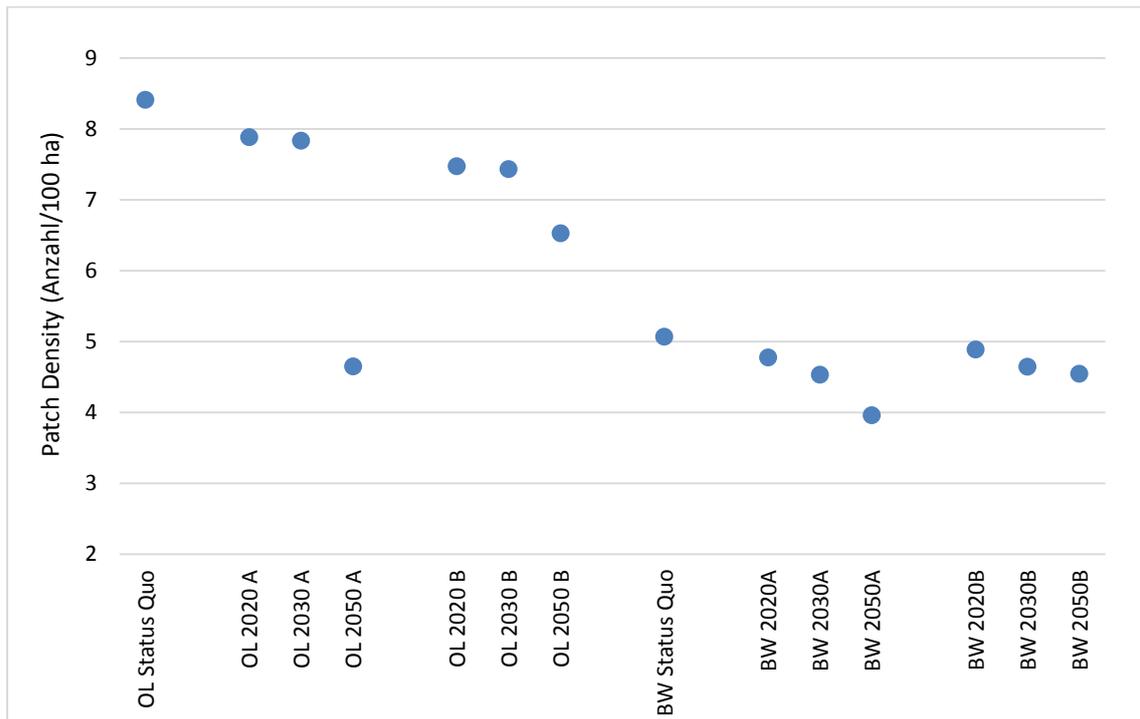


Abb. 19: Patch Density (PD) für die Szenarien auf Landschaftsebene

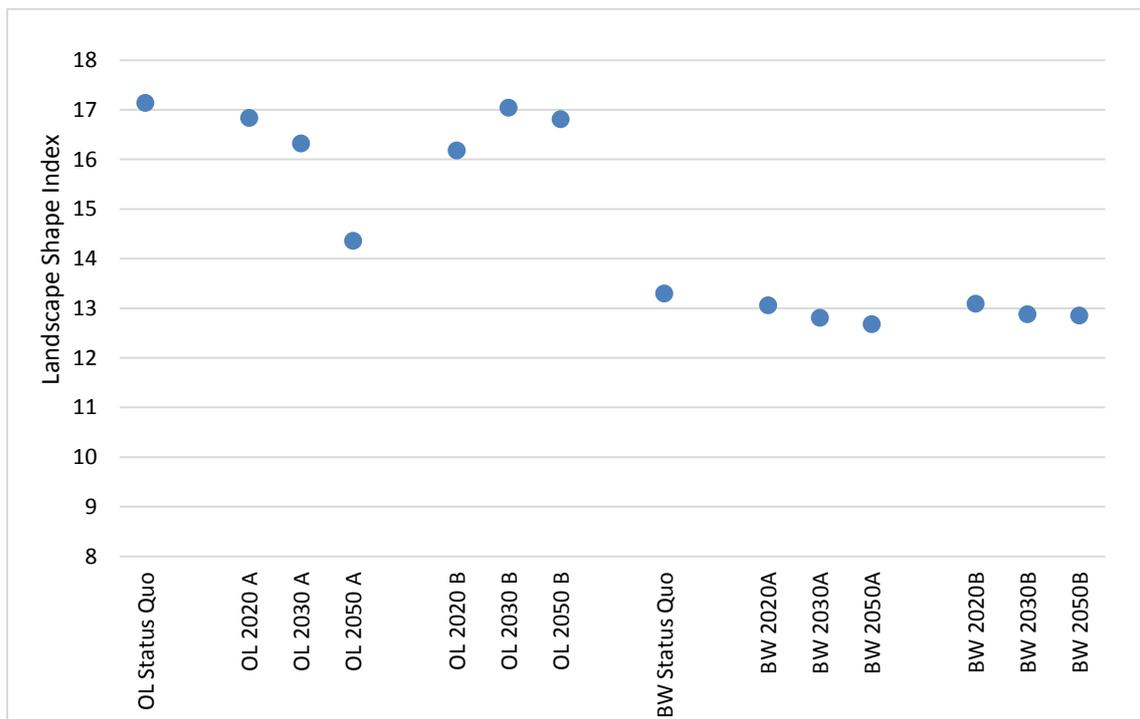


Abb. 20: Landscape Shape Index (LSI) für die Szenarien auf Landschaftsebene

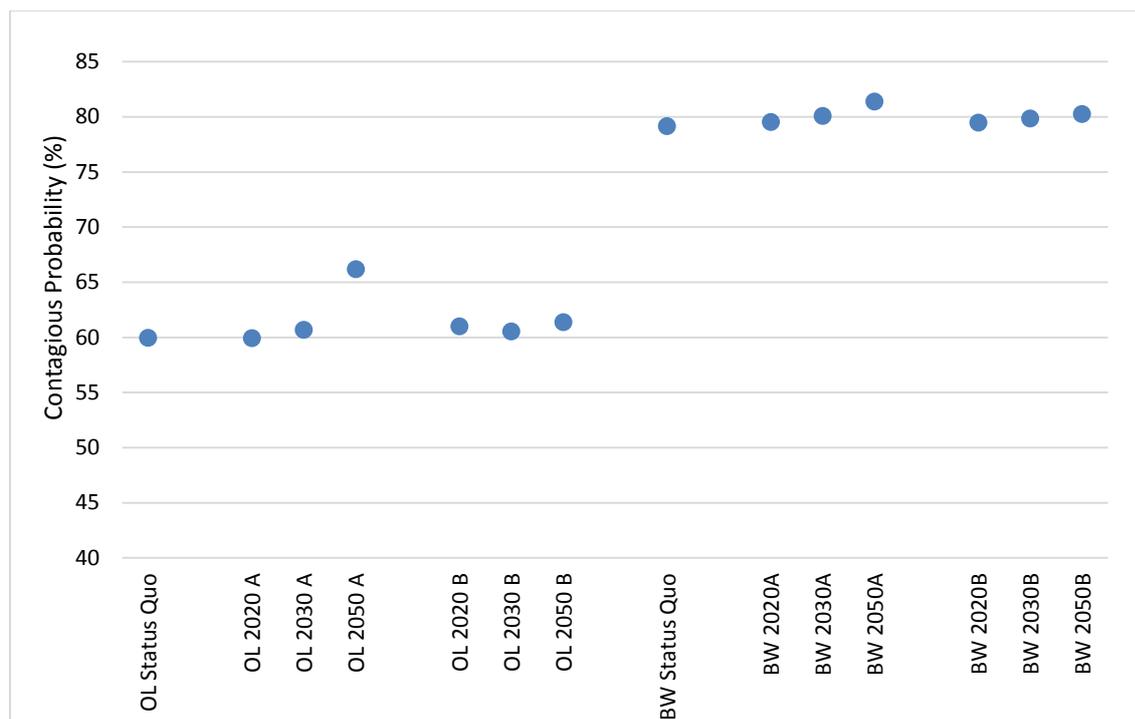


Abb. 21: Contagious Probability (CONTAG) für die Szenarien auf Landschaftsebene

Es fällt auf, dass sich CONTAG gegenläufig zu LSI verhält, d.h. je höher CONTAG desto niedriger ist der LSI (Korrelationskoeffizient von $r = -0,98$). Auch ED und LSI korrelieren im hohen Maße positiv ($r = 0,98$), wie auch CONTAG mit ED negativ ($r = -0,998$). Der LSI bei Oldenburg Szenario B verhält sich allerdings gegenläufig zum übrigen Trend.

4.6.1.3 Metrikauswertung auf Klassenebene

Die Metrikauswertung auf Klassenebene erlaubt ein differenziertes Bild auf die Veränderung der Eignungsbereiche durch die Szenarien. Die einfachste Beschreibung erfolgt anhand der Flächenanteile (PLAND, s. Abb. 22 und Abb. 23).

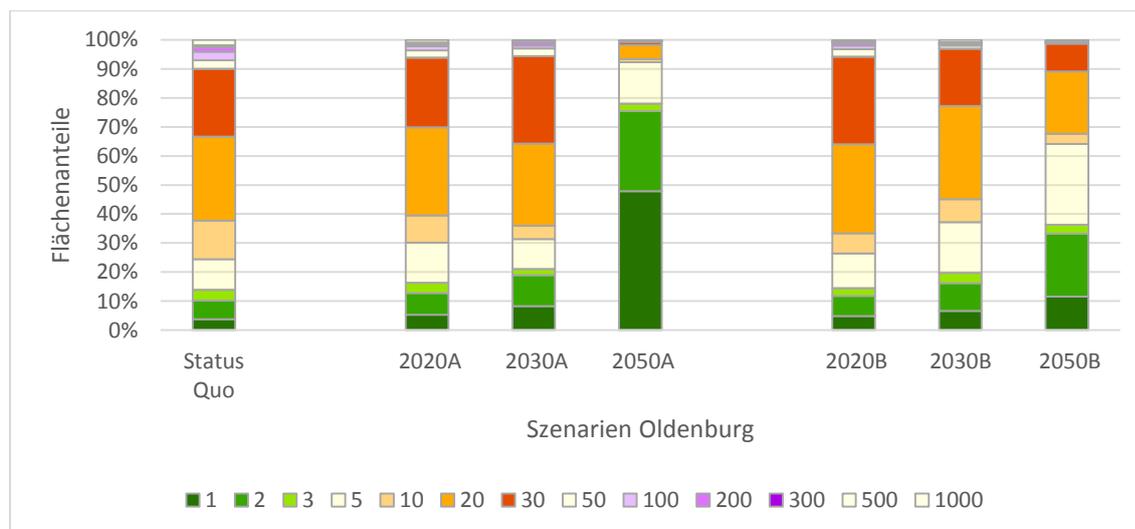


Abb. 22: Flächenanteile der Eignungsklassen für die Szenarien in Oldenburg

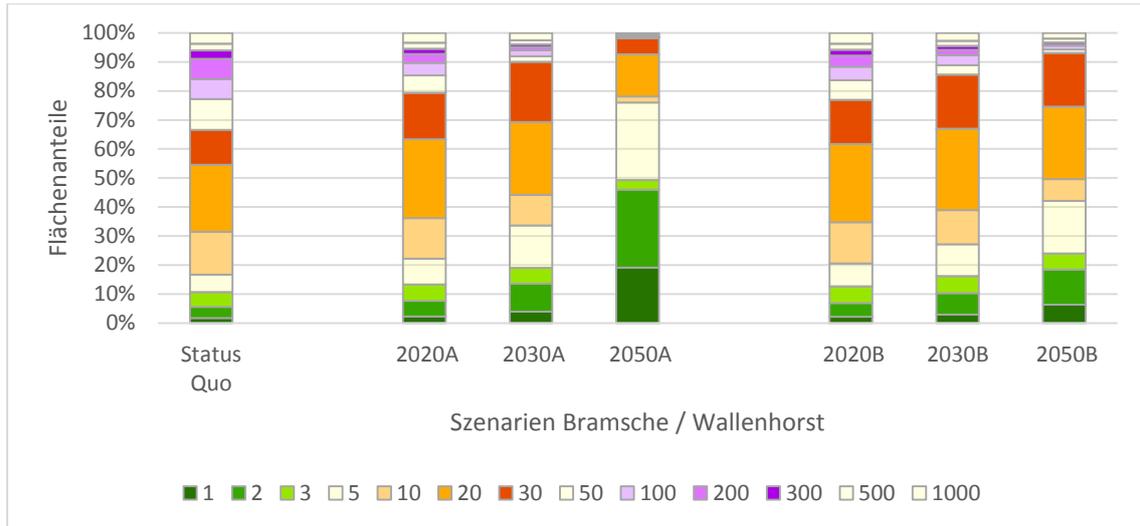


Abb. 23: Flächenanteile der Eignungsklassen für die Szenarien in Bramsche / Wallenhorst

Mit Hilfe der Edge Density kann verfolgt werden, inwieweit sich die räumliche Verzahnung der Eignungsbereiche verändert (s. Abb. 24 und Abb. 25).

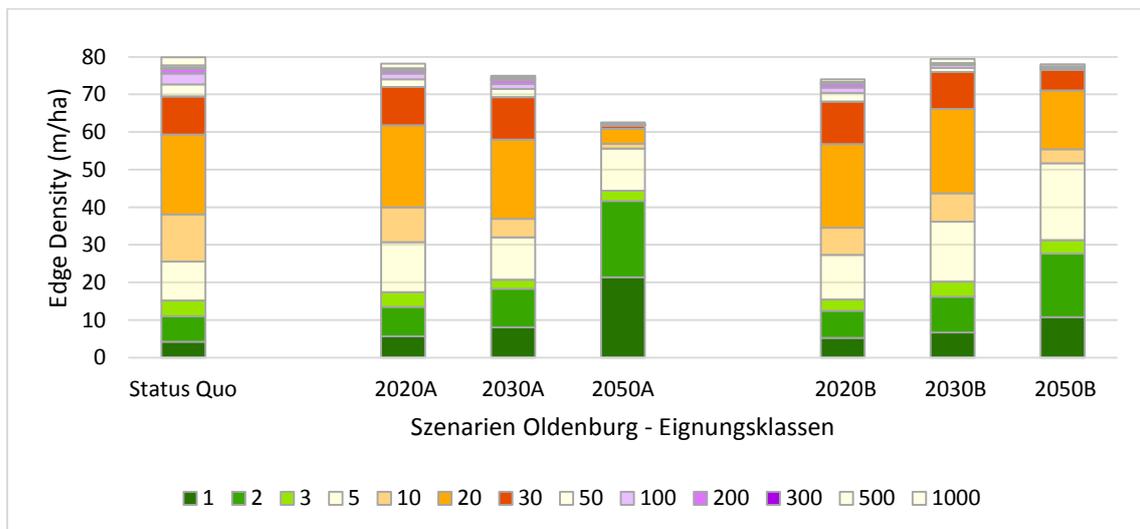


Abb. 24: Edge Density (m/ha) der Eignungsklassen für die Szenarien in Oldenburg

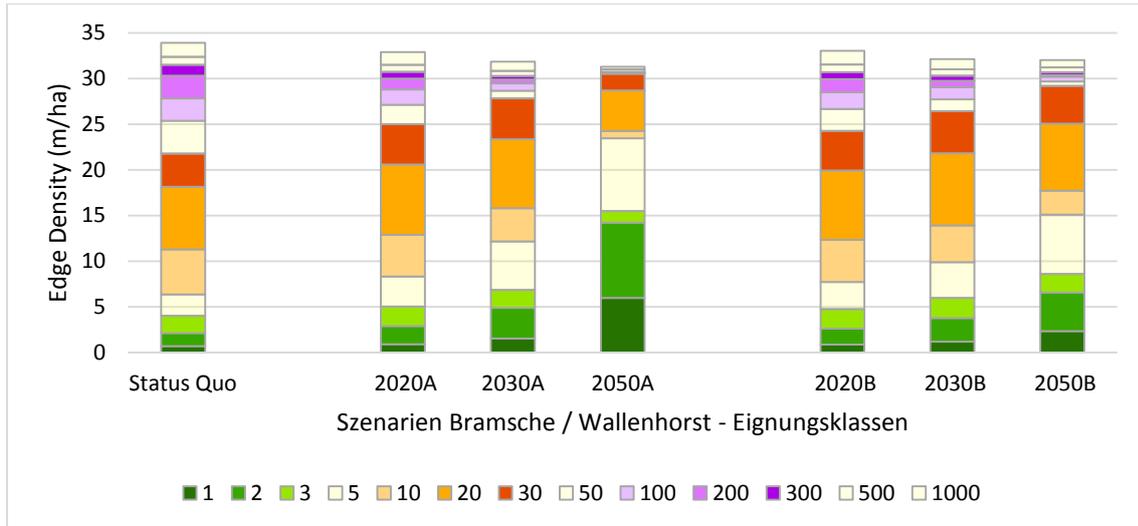


Abb. 25: Edge Density (m/ha) der Eignungsklassen für die Szenarien in Bramsche / Wallenhorst

Mit Hilfe des nLSI können die Eignungsbereiche auf Klassenebene hinsichtlich ihrer räumlichen Disaggregation analysiert werden. Um einen direkten Vergleich zwischen Oldenburg und Bramsche / Wallenhorst zu ermöglichen, erfolgt eine Gegenüberstellung auf Ebene der Klassengruppen (s. Abb. 26).

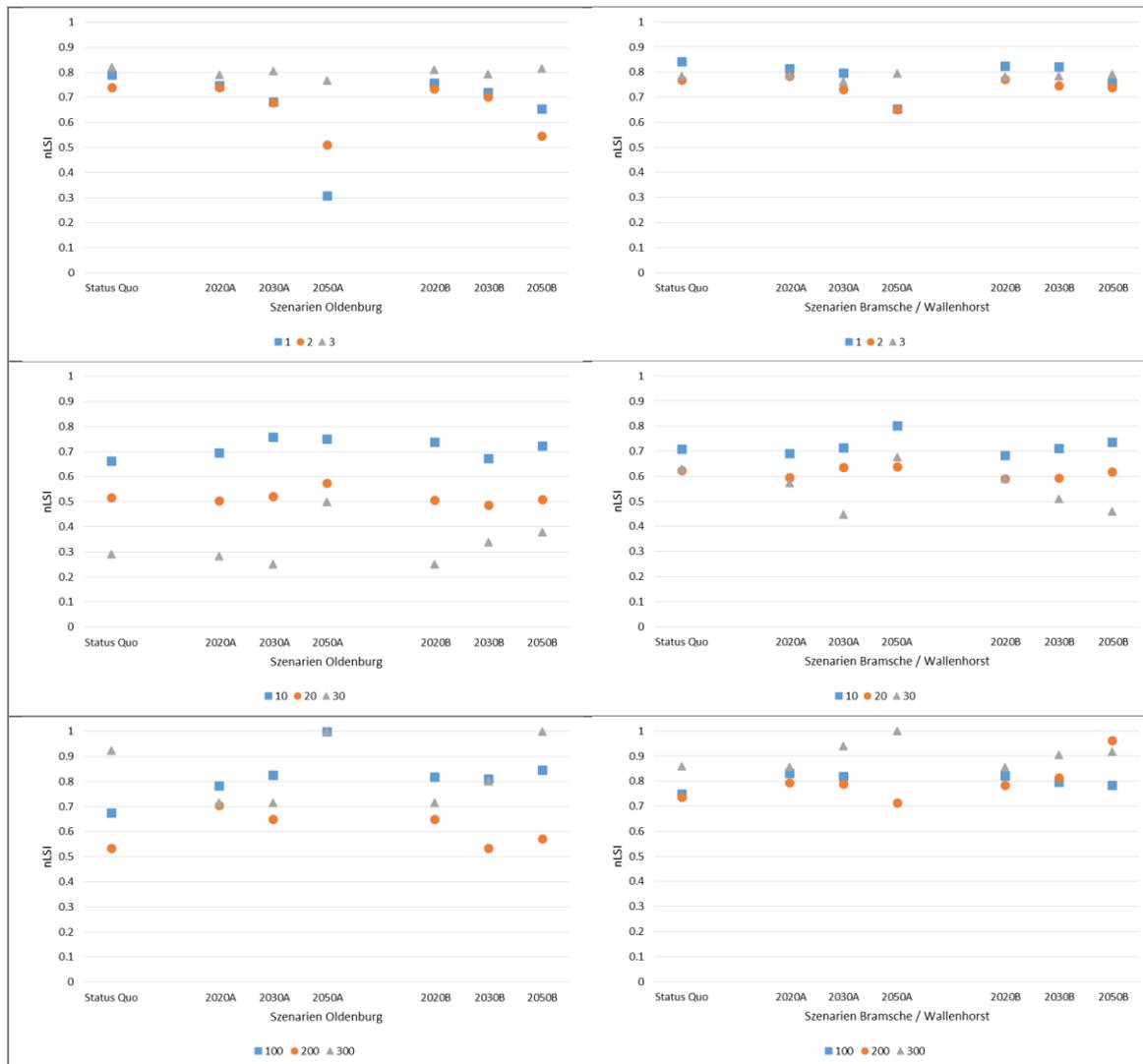


Abb. 26: Vergleich der nLSI bezogen auf Eignungsgruppen

4.6.2 Hotspot - Analyse

Eine Hotspot - Analyse ermöglicht die Identifizierung statistisch signifikanter Cluster, die sich v. a. für LowEx in Oldenburg abzeichnen (s. Diskussion 4.6.3). Im Fokus stehen die Eignungsbereiche, sodass als zu analysierender Wert die Fuzzy Membership, d. h. der Grad der Zugehörigkeit, herangezogen wird (s. a. Publikationen P 2 - P 4). Die rasterbasierte Fuzzy Membership wird zunächst in ein Punkt-Feature (Mittelpunkt) umgewandelt. Somit repräsentiert jeder Punkt ein 100 x 100 Raster. Die Hotspot - Analyse benötigt möglichst räumlich zusammenhängende Daten. Bei einer zu stark zerklüfteten Siedlungsstruktur würden ansonsten zu viele NoData Bereiche herangezogen werden. Die Hotspot - Analyse liefert für jeden Punkt eine Wahrscheinlichkeit, ob das beobachtete Muster von einem zufälligen räumlichen Prozess erzeugt wird (Nullhypothese). Wenn der p-Wert der Hotspot - Analyse sehr klein ist, dann liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit kein zufälliger Prozess vor und die Nullhypothese muss verworfen werden. In der folgenden Tabelle sind die zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit erforderlichen p-Werte enthalten.

Tab. 11: p-Werte und Konfidenzniveaus der Hotspot - Analyse, vgl. [69]

Z-Wert (Standardabweichungen)	p-Wert (Wahrscheinlichkeit)	Konfidenzniveau
< -1,65 oder > +1,65	< 0,10	90%
< -1,96 oder > +1,96	< 0,05	95%
< -2,58 oder > +2,58	< 0,01	99%

Die Hotspot - Analyse verwendet die G_i^* -Statistik. Im Gegensatz zur G_i -Statistik wird der Wert des Zielpunktes (Wärmebedarf eines jeweiligen Gebäudes) miteinbezogen. Der G_i^* -Wert wird berechnet, indem die Summe der Nachbarn innerhalb des Analysebands inkl. des Zielpunktes durch die Summe aller Wärmebedarfe geteilt wird. Ein G_i^* -Wert nahe 0 zeigt an, dass kein Hotspot vorliegt, da sich der Wert nahe dem Durchschnitt befindet. Der Z-Wert stellt wiederum die Standardabweichung des G_i^* -Wertes für jeden Punkt dar. Weitere Ausführungen finden sich bei Mitchell (2009) [69]. Um sich einer Hotspot - Analyse zu nähern, wird zunächst eine automatisierte Analyse (Optimized Hot Spot Analyse) mit ArcGIS durchgeführt. Dabei wird vom System ein Analyseband von 384 m festgesetzt.

Dies führt dazu, dass viele und große Hotspots erzeugt werden, die eine Vielzahl von Zellen enthalten, in denen nach den Grunddaten eigentlich keine Eignung vorliegt. Daher wird ein Vergleich der Analysebänder von 150 m und 250 m durchgeführt. Beim Analyseband von 150 m ist eine relative fragmentierte Hotspot - Bildung zu beobachten. Das Analyseband von 250 m kommt dem räumlichen Anspruch und erforderlichen Ausdehnung von Wärmenetzen am nächsten und es bilden sich räumlich kompaktere Cluster.

Die folgende Abbildung verdeutlicht die Ausdehnung des Analysebands im Siedlungskontext.

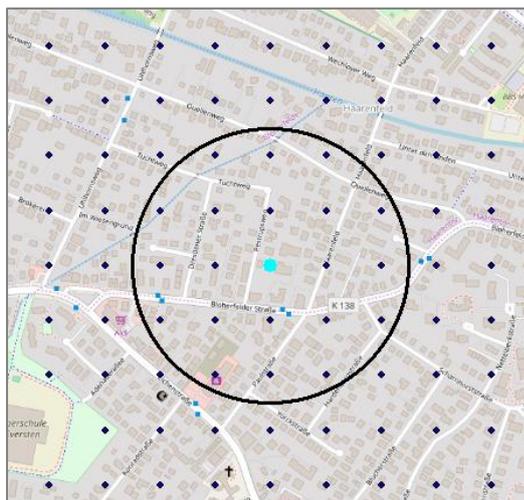


Abb. 27: Verdeutlichung des 250 m Analysebandes im Siedlungskontext (unmaßstäblich, OSM-Kartenhintergrund)

Daher wird die Analyse nicht geostatistisch abgeleitet, sondern auf ein funktionelles, in Bezug auf die Ausdehnung von Wärmenetzen ausgerichtetes Analyseband.

Am Beispiel der LowEx - Eignungsbereiche in Oldenburg (s. Publikation P 2) wird eine Hotspot - Analyse entlang der Zeitachse durchgeführt. Die Betrachtung der LowEx - Bereiche in Oldenburg eignet sich im Besonderen, da

- die räumliche Disaggregation für LowEx - Eignung im Szenarienvorlauf relativ gleichbleibend ist (s. Abb. 26, Mitte), und
- Oldenburg über große, zusammenhängende Siedlungsbereiche verfügt.

Die Hotspots werden gemäß den Konfidenzniveaus unterschiedlich eingefärbt (von hellrot (90%) bis dunkelrot (99%))

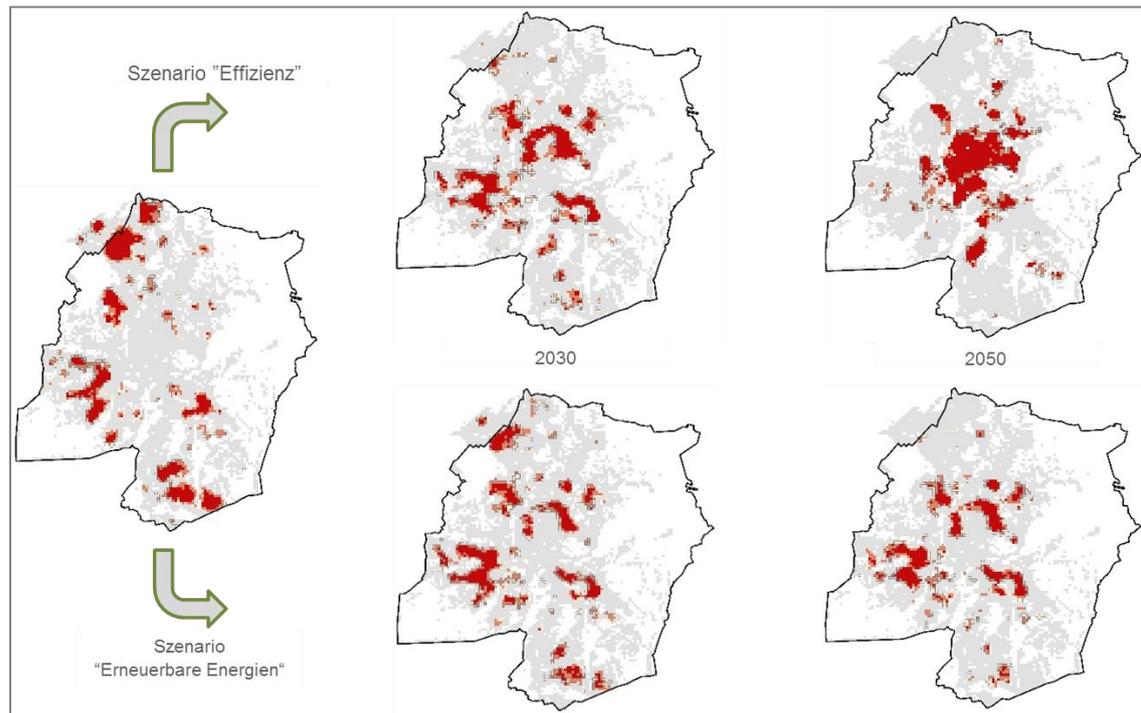


Abb. 28: Szenarienbasierte Hotspot-Analyse von LowEx-Eignungsbereichen in Oldenburg

Die übrigen Eignungsbereiche werden an dieser Stelle nicht vorgestellt, da sie entweder zu kleinteilig im Szenarienvorlauf sind (kl. Nahwärme) oder sich vornehmlich in der Peripherie befinden (Einzelversorgung), s. a. Kap. 4.3.

4.6.3 Diskussion und Zwischenfazit

Auf Landschaftsebene kann festgestellt werden, dass die Verteilung der Patches im Zeitverlauf in der Regel abnimmt (sinkender LSI). Besonders stark ausgeprägt ist dies bei OL 2050 A. Beim Oldenburger B-Szenario ist allerdings ein gegenläufiger Effekt zu beobachten. Hier scheinen Patches sich weiter zu verteilen, was als Hinweis auf eine Bildung disperser Cluster gedeutet werden kann.

Das A-Szenario führt durchgängig zu einer starken Abnahme der PD und LSI sowie zu einer Zunahme des CONTAG, das bedeutet, dass die nachbarschaftlichen Strukturen stabiler werden.

Die Aussage „Je stärker die Reduktion des Wärmebedarfs über die Zeit ausfällt, desto geringer wird die räumliche Variabilität der Siedlungsstruktur bezogen auf Eignungsbereiche.“ kann damit als bestätigt gelten.

Auf Klassenebene ist in den A-Szenarien ein starker Anstieg der Flächenanteile der Rasterzellen mit Einzelversorgung zu beobachten, die eine geringe Wärmeliniendichte repräsentieren.

Auffallend ist auch hier die Situation bei OL 2050 A. Einzelversorgung ist mit nahezu 80% dominant vertreten, was in der besonderen Siedlungsstruktur in Oldenburg, bestehend v. a. aus vielen Ein- und Zweifamilienhäusern, begründet sein kann. Das führt im A-Szenario zu einer nahezu disruptiven Entwicklung zwischen 2030 und 2050 hinsichtlich der Wärmeversorgungsstruktur. Vor dem Hintergrund langfristiger Planungen ist dies ein bedeutender Hinweis.

Dieser Effekt ist in Bramsche/Wallenhorst nicht so stark ausgeprägt. Allerdings liegt in Form des sehr großen, indifferenten Anteils zwischen Einzelversorgung und LowEx ein vergleichbares Potenzial wie in Oldenburg vor.

Die ED nimmt im A-Szenario im Bereich der Einzelversorgung stärker zu als beim B-Szenario. Wenn man die gesamte ED betrachtet, fällt auch hier OL 2050 A mit einem starken Abfall der ED auf, was auf eine Reduktion der Gesamtverzahnung hinweist. Gegenläufig ist allerdings das B-Szenario von Oldenburg, was mit dem LSI auf Landschaftsebene korrespondiert. Das bedeutet, dass sich im B-Szenario Cluster mit einer stärkeren Verzahnung gebildet haben.

Die Analyse des nLSI gibt Einblick in die räumliche Disaggregation der Eignungsbereiche. Die Disaggregation der Einzelversorgung nimmt in Oldenburg stärker ab als in Bramsche/Wallenhorst. Auch hier ist eine starke Ausprägung bei OL 2050 A zu beobachten.

Der nLSI nimmt bei LowEx in Oldenburg tendenziell zu, was ebenfalls für eine Clusterbildung spricht. In Bramsche/Wallenhorst ist die Tendenz eher indifferent, aber auf hohem Niveau, was wiederum auf Cluster bzw. auf Grund der geringen Flächengröße auf Inseln hindeutet.

Diese Inselbildung ist bei den Bereichen mit klassischer Nahwärme sehr gut zu beobachten. Insbesondere die Bereiche mit hoher Eignung weisen hohe nLSI-Werte auf.

Die **Hypothese F2-H4** („Je stärker die Reduktion des Wärmebedarfs über die Zeit ausfällt, desto geringer wird die räumliche Variabilität bezogen auf Eignungsbereiche mit geringer Wärmeliniendichte.“) kann damit als bestätigt gelten. Insbesondere in Oldenburg können auf Grund der vorherrschenden Siedlungsstruktur bei ambitionierten Reduktionszielen schlagartig große Bereiche der Einzelversorgung zugeordnet werden. Die räumliche Variabilität nimmt insgesamt zwar ab, für LowEx-Bereiche ist allerdings eine Clusterbildung zu beobachten. Inwieweit sich diese Cluster im zeitlichen Verlauf allerdings verlagern, kann nur mit einer Hotspot - Analyse genauer untersucht werden (s. Kap. 4.6.2).

Allerdings kann die **Hypothese F2-H5** („Je stärker die Reduktion des Wärmebedarfs über die Zeit ausfällt, desto stärker verlagern sich Schwerpunkte der Eignungsbereiche.“) nur bedingt bestätigt werden.

Im A-Szenario kann diese Verlagerung für LowEx-Bereiche sehr gut beobachtet werden, während im B-Szenario die LowEx-Bereiche relativ stabil bleiben, wenn sie nicht von der Einzelversorgung verdrängt werden (s. a. Kartenübersichten in Kap. 4.3). Im A-Szenario findet eine Verdrängung der LowEx-Bereiche statt und die „frei“ werdenden Bereiche werden von der Einzelversorgung belegt. Generell geht der Anteil an klassischer Nahwärme zurück und fällt im A-Szenario nahezu ganz aus. Die Einzelversorgungsbereiche verlagern sich somit kaum, sondern dehnen sich aus.

Die räumliche Verlagerung im A-Szenario bedeutet für die Planung zweierlei:

- In den peripheren Bereichen ist ein Bau von LowEx-Netzen nicht rentabel.
- Im Zentrum kann mit dem Bau von Netzen begonnen werden, sie sollten aber von Nahwärme auf LowEx umrüstbar sein.

Die räumliche Stabilität im B-Szenario bedeutet, dass schon jetzt mit den LowEx-Netzen in den Kernbereichen begonnen werden kann.

4.7 Integration erneuerbarer Energien

Der hier vorgestellte Ansatz bewegt sich auf einer zeitlich abstrakteren Ebene als dies bei der technischen Detailplanung notwendig ist. Für eine erste Abschätzung der Deckung der Bedarfe ist ein bilanzieller Ansatz auf Jahresebene ausreichend. Bei Strom sollte noch zwischen Heizperiode und Nicht-Heizperiode unterschieden werden, da dies v.a. beim Zusammenspiel zwischen Brauchwasseraufbereitung und Gebäudewärme zum Tragen kommt.

Die Integration von Strom wird in der Publikation P 4 vorgestellt. Hierbei wird zwischen Photovoltaik und Windstrom unterschieden. In der Publikation P 3 wird ein Modell für die Integration industrieller Abwärme entworfen und in der Publikation P 4 ein weiteres Mal ausgeführt, da sich die Grunddaten seitens des Landkreises Osnabrück in der Zwischenzeit verändert haben (s. P 4).

Die Integration erneuerbarer Energien wird am Beispiel der Städte Bramsche/Wallenhorst durchgeführt, da für diese Städte zum einen ein Solarkataster [70] vorliegt und zum anderen eine Studie zum Abwärmepotenzial durchgeführt wird [71].

4.7.1 Photovoltaik und Windstrom

Die Photovoltaik kann in unterschiedlichen Eignungsbereichen einen Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien in die Wärmeversorgung liefern (s. P 4):

- In Eignungsbereichen der Einzelversorgung steht der Betrieb von Wärmepumpen im Vordergrund. Während der Heizperiode liegt allerdings eine Unterdeckung vor, die z. B. durch Windkraft ausgeglichen werden muss.
- In allen Eignungsbereichen stellt sich die Frage der Aufbereitung des Brauchwassers in der Nicht-Heizperiode. Hier kann das Photovoltaikpotenzial theoretisch den gesamten Bedarf decken, sodass die Wärmenetze abgeschaltet werden könnten. Allerdings ist in Eignungsbereichen mit klassischen Nahwärmenetzen ein solches Abschalten problematisch.

Die Publikation P 4 führt zu den jeweiligen Aspekten eine ausführliche Diskussion und Bilanzierung durch.

4.7.2 Industrielle Abwärme

Die Integration industrieller Abwärme stellt eine sehr interessante Möglichkeit dar, die CO₂-Emissionen im Wärmesektor zu reduzieren. Die Integration in die Wärmeversorgung bedingt eine leitungsgebundene Versorgung, sodass der Suchradius um eine Quelle auch aus Sicht der jeweiligen Eignungsbereiche definiert wird. Diese Umkehrung weicht von bisherigen Ansätzen ab, die den Suchradius von der Quelle her definiert haben und somit letztendlich die klassische Nahwärme als Zielsystem gesetzt haben, s. a. [60]. In der Publikation P 3 wird das vereinfachte Modell vorgestellt und in der Publikation P 4 für Bramsche / Wallenhorst vertieft.

4.7.3 Diskussion und Zwischenfazit

Die Stärke der explizit räumlichen Zusammenführung von Potenzial und Bedarf liegt darin, dass die jeweiligen Rollen der Energiequellen im zukünftigen Energiesystem genauer umrissen werden können und somit die Diskussion zielgerichteter geführt werden kann. Auch kann damit verdeutlicht werden, was der Umbau des Wärmeversorgungssystems an Konsequenzen nach sich ziehen kann, wenn z. B. dadurch der Ausbau der Windkraft einen neuen Schub erfahren sollte. Auf der anderen Seite wird deutlich, wie sehr in diesem Fall die Reduktion des Wärmebedarfs und der Ausbau der Photovoltaik und ggf. der Windkraft zusammenhängt.

Die Integration industrieller Abwärme stellt eine sehr interessante Option dar, die CO₂-Emissionen im Wärmesektor zu reduzieren. Vor allem bei hohen Wärmebedarfen sind andere erneuerbare Wärmequellen nur mit einem hohen technischen Aufwand zu erschließen. Allerdings ist auch festzustellen, dass die Wärmeversorgung nicht allein darauf basieren darf. Firmen können ihren Standort verlegen, die Produktion effizienter gestalten etc., sodass sich das Abwärmepotenzial stark ändern kann. Es wird daher empfohlen, die industrielle Abwärme als eine Ergänzung und Unterstützung für den Umbau der Wärmeversorgung und nicht aber als alleinigen Auslöser zu sehen.

Die **Hypothese F3-H1** („Je mehr lokal produzierter erneuerbarer Strom für die Wärmeversorgung zur Verfügung steht, desto besser kann die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung erfolgen.“) kann unter der Prämisse bestätigt werden, dass je nach Eignungsbereich der Einsatz von Strom für die Wärmeversorgung sehr unterschiedlich ausfällt. Während er im Bereich der Einzelversorgung ein wichtiger Baustein ist, nimmt die Bedeutung mit Anstieg des Wärmebedarfs ab. Da sich allerdings der Anteil der Bereiche mit Eigenversorgung in beiden Szenarien erhöhen wird, kann die Hypothese durchaus bestätigt werden.

Die **Hypothese F3-H2** („Je mehr industrielle Abwärme integriert wird, desto besser kann eine Dekarbonisierung der Wärmeversorgung erfolgen.“) kann nur bedingt bestätigt werden, da industrielle Abwärme nur als Ergänzung gesehen werden sollte. Der bilanzielle Vergleich innerhalb der Suchradien zeigt auch, dass der Anteil zur Deckung des Wärmebedarfs mit bis zu 30% (P 4, p. 21) nicht für eine Bedarfsdeckung reicht. Allerdings kann die industrielle Abwärme sehr gut als Projektanschub für den Umbau der Wärmeversorgung genutzt werden.

4.8 Einzelentscheidungen im Kontext einer kommunalen Wärmeplanung

4.8.1 Agentenbasierte Modellierung (ABM)

Die bisherigen Ausführungen haben die Ableitung von Eignungsbereichen und deren räumliche Konfiguration und energetischen Ausprägungen zum Inhalt. In den Publikationen werden auf Basis eines Nachbarschaftsbegriffs mit räumlicher Unschärfe technologische Transformationsoptionen aufgezeigt.

Eine Nachbarschaft besteht aus handelnden Individuen, die das Konzept und die damit einhergehende gewünschte Veränderung in der Wärmeversorgung ablehnen oder annehmen können. In der Publikation P 5 wird der Frage nachgegangen, inwieweit individuelle Entscheidungen auf Gebäudeebene eine strategische Wärmeplanung unterstützen können (F4).

Daran schließt sich die weitergehende Frage an, ob mithilfe der Einzelentscheidungen eine Modifizierung der strategischen Wärmeplanung vorgenommen werden kann, die kleinräumige Besonderheiten besser berücksichtigt.

Somit werden Einzelentscheidungen als Gegenstrom zur strategischen Wärmeplanung verstanden, die konstruktiv genutzt werden können. Oder anders formuliert: Bis zu welchem Grad können konträre Entscheidungen verkraftet werden, ohne dass die gesamte strategische Wärmeplanung verworfen werden muss?

Auf Basis der Ausführungen in Kap. 2.2 zum Thema komplexe Systeme wird in der Publikation P 5 ein Modellansatz vorgestellt, mit dem mit Hilfe einer agentenbasierten Modellierung diesen Fragestellungen nachzukommen versucht wird.

4.8.2 Diskussion und Zwischenfazit

Ein wesentlicher Kritikpunkt besteht darin, dass die im Modellansatz verwendeten Wärmebedarfsklassen „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ zu vage sind (s. Diskussion in P 5). Hier fehlt es an Detailinformationen, die eine genauere Zuordnung der Gebäude ermöglicht. Auch wurde in den Entscheidungsregeln nicht berücksichtigt, dass Gebäude mit einem mittleren Wärmebedarf sich auch für Einzelversorgung entscheiden können. Im Ergebnis führt dies zu einer scharfen Trennung zwischen Einzelversorgung und netzgebundener Versorgung (LowEx, kl. Nahwärme). Die Gebäudeinformationen müssen für weitere Untersuchungen noch weiter aufgelöst werden, um technische Transformationspotenziale ableiten zu können. Zusätzlich fehlen weitere sozio-ökonomische Parameter, wie z. B. Sinus-Milieu-Daten [72], die eine Transformationsbereitschaft besser abschätzen helfen.

Trotz aller Einschränkungen ist das bisherige Modell geeignet, um die aufgeworfenen Hypothesen zu beantworten:

Die **Hypothese F4-H1** („Je höher der Freiheitsgrad bei der Entscheidung, desto stärker fällt die Abweichung in Bezug auf die Eignungsbereiche aus.“) kann bestätigt werden. Wie aus der Abb. 2 der Publikation P 5 entnommen werden kann, liegen bei einem hohen Anteil „Zufall“ bei der Entscheidungsfindung sehr hohe Abweichungen vom Ausgangszustand vor. Bei der Entscheidungsfindung „Nachbar“ kann es zu Entscheidungsblockaden kommen, da Gebäude in der Nachbarschaft eine Entscheidung eines anderen Gebäudes

voraussetzt. Dies zeigt sich v. a. an dem hohen Anteil indifferenter Bereiche bei der Entscheidungskombination „Zufall“ und „Zelle“.

Allerdings fallen je nach Kombination die Abweichungen vom Ausgangszustand sehr unterschiedlich aus. In nahezu allen Fällen liegt eine Zunahme der Anteile für kl. Nahwärme vor. Ein wachsender Anteil an „Nachbar“ führt zu einer Zunahme an Einzelversorgung. Interessant sind Testdurchläufe mit allen drei Kombinationen. Hier zeichnet sich ab, dass „Zufall“ kl. Nahwärme zu Lasten von LowEx begünstigt

Das bedeutet, dass nahezu alle indifferente Bereiche in konkrete Eignungsbereiche transformiert werden, die Entscheidung auf Gebäudeebene führt also zu einer Konkretisierung. Diese Konkretisierung fällt allerdings sehr unterschiedlich aus, was wiederum Hinweise darauf liefert, dass die zuvor abgeleiteten Eignungsbereiche teilweise modifiziert werden (s. Abb. 3 in Publikation P 5). Mit dem Ansatz kann allerdings nicht festgestellt werden, wo sich stabile und weniger stabile Bereiche bei der Entscheidungsfindung je Kombination befinden.

Die **Hypothese F4-H2** („Abweichende Individualentscheidungen haben bis zu einem bestimmten Grad keinen Einfluss auf einen Eignungsbereich.“) kann differenzierter ausgeführt werden. Da mit diesem Modell eine Differenzierung zwischen LowEx und kl. Nahwärme kaum möglich ist, wird untersucht, inwieweit sich Gebäude, die sich für eine Einzelversorgung entschieden haben, innerhalb von Eignungsbereichen für LowEx und kl. Nahwärme befinden (s. Tab. 4 in Publikation P 5). Es kann davon ausgegangen werden, dass alle drei Entscheidungstypen bei einer Umsetzung vorliegen werden, sodass im Weiteren die Kombinationen genauer untersucht werden. Auffallend ist, dass sich innerhalb der LowEx- und Nahwärme-Bereiche relativ viele der Gebäude befinden, die sich für Einzelversorgung entschieden haben, ohne dass sich die Entscheidung auf den Eignungsbereich auswirkt. Die **Hypothese F4-H2** kann für Gebäude mit Einzelversorgung somit bedingt bestätigt werden. Das wiederum bedeutet, dass LowEx- und Nahwärme-Bereiche unter Berücksichtigung des 70%-Kriteriums hinsichtlich des Wärmebedarfs (s. P 5) ohne weiteres abweichende Entscheidungen verkraften können. Allerdings muss die nachfolgende Detailplanung den erforderlichen Anschlussgrad für einen wirtschaftlichen Betrieb genauer bestimmen.

4.9 Zusammenfassende Bewertung

Die Wahl des Raumbezugs und der damit verbundenen Konzeptualisierung ist wesentlich für die Berücksichtigung von Potenzialen und Bedarfen und beeinflusst maßgeblich das Ergebnis. Die Wahl eines der Fragestellung adäquaten Raumbezugs ist hierbei essentiell für eine gemeinsame Verständigung zwischen Stadtplanung und Energieplanung.

Allerdings können die Metriken nicht herangezogen werden, um diese Aussage eindeutig zu untermauern. Die unterschiedlichen Herangehensweisen bei der Ermittlung von Eignungsbereichen auf Baublock- und Rasterebene verdeutlichen das Dilemma:

Die zuvor abgegrenzten Baublöcke beeinflussen die Analyse der Eignung. Sie sind daher auf Ebene der Detailplanung anzusiedeln, wenn es um die Umsetzung von Maßnahmen geht, wobei die Eignungsbereiche als planerische Leitplanken zu verstehen sind.

Die Forschungsfrage F1 („Welche räumliche Konzeptualisierung vermittelt zwischen räumlicher und energetischer Planung?“) kann somit wie folgt beantwortet werden:

Die Stadtplanung erhält mit den rasterbasierten Eignungsbereichen ein valides Werkzeug an die Hand, mit dem eine räumlich explizite Zielvereinbarung entwickelt werden kann, die dann in der nachfolgenden Detailplanung konkretisiert werden muss. Die Frage ist nicht, ob das Raster- oder das Vektorkonzept richtig ist. Entscheidend ist der Einsatz der jeweiligen räumlichen Konzeptualisierungen an den richtigen Stellen im Prozess der Wärmeplanung: „It is the purpose of the model that should determine the choice of an adequate spatial bordering concept.“ [29, p. 282]

Die Validität der Eignungsbereiche spielt in die Forschungsfrage F2 hinein („Wie können Raumanalysewerkzeuge so eingesetzt werden, dass Wärmeversorgungsoptionen räumlich und zeitlich adäquat abgebildet werden können?“). Es kann aufgezeigt werden, dass die Eignungsbereiche die Verteilungen von Wärmebedarfen und Wärmelinien dichten widerspiegeln und statistisch signifikant voneinander unterschieden werden können. Die räumliche Mittlerrolle der indifferenten Bereiche kann ebenfalls bestätigt werden. Ein kritischer Aspekt ist die Modellierung der Leitungslängen. Diese werden sich im Zuge der Detailplanung sehr wahrscheinlich anders darstellen, als im Zuge der Ermittlung der Eignungsbereiche, da funktionale Netzbereiche geplant werden müssen.

Der zweite Aspekt der Forschungsfrage F2 befasst sich mit dem Punkt der raumzeitlichen Dynamik. Die Konfiguration der Eignungsbereiche erfährt einen Wandel, der sich unterschiedlich stark ausprägt ist, je nachdem welche Szenarien verfolgt werden. Mit Hilfe der Metriken kann das Maß des Wandels quantifiziert und mit Hilfe der Hotspot - Analyse Handlungsbereiche abgegrenzt werden. Die Hotspot - Analyse erlaubt es Entscheidungsträgern eine Einschätzung vorzunehmen, inwieweit Bereiche in der Stadt bspw. sehr stabil gegenüber verschiedenen Szenarien sind und somit zukunftsfestere Technologieentscheidungen ermöglichen. Das bedeutet aber auch, dass zukünftige Technologieentwicklungen mitgedacht werden müssen (s. Kap. 5.5).

Die Forschungsfrage F3 („Wie können Potenziale erneuerbarer Energien berücksichtigt werden, sodass eine Aussage über die zukünftige Entwicklungsrichtung getätigt werden kann?“) kann insofern beantwortet werden, als dass die betrachteten Energieformen Strom und Abwärme je nach Eignungsbereich zu sehr unterschiedlichen Anteilen und mit sehr unterschiedlichen Rollen integriert werden können. So kann Strom vor allem in den Eignungsbereichen mit Einzelversorgung eingesetzt werden, industrielle Abwärme kann ihre Vorzüge in klassischen Nahwärmenetzen einbringen. Allerdings ist festzustellen, dass je nach Sanierungsgrad die erforderlichen Strommengen, die von extern eingebracht werden müssen, sehr unterschiedlich ausfallen werden. Das bedeutet, dass über den Sanierungsgrad unmittelbar die Notwendigkeit eines Ausbaus z. B. der Windenergie angezeigt wird.

Die Beantwortung der Forschungsfrage F4 („Inwieweit können Einzelentscheidungen auf Gebäudeebene eine strategische Wärmeplanung unterstützen?“) kann nur bedingt beantwortet werden. Die Analysen zeigen auf, dass der Freiheitsgrad bei der Entscheidungsfindung sehr wichtig ist, ob das Ergebnis der Eignungsbereiche Bestand haben wird oder nicht. Allerdings sind das Modell und die dahinterliegenden Grundannahmen hinsichtlich

Gebäudeeinstufung noch zu grob. Zumindest kann aufgezeigt werden, dass moderate Abweichungen die Gesamtplanung nicht zum Kippen bringen. So können Gebäude mit Einzelversorgung durchaus von anderen Eignungsbereichen verkraftet werden. Allerdings kann erst auf Ebene der Detailplanung eine genauere Aussage getroffen werden, ob der verbleibende Anschlussgrad ausreichend ist, vgl. hierzu auch das Projekt [73]. Das entwickelte Modell ist nicht dafür geeignet, auf Ebene der Detailplanung verschiedene Freiheitsgrade hinsichtlich des Anschlussgrads zu testen. Es kann allerdings der Schluss gezogen werden, dass beim Schritt von der strategischen Wärmeplanung zur Detailplanung Abweichungen zwecks Erhöhung der Akzeptanz zugelassen werden können. Die Detailplanung sollte darauf in Form einer flexiblen Angebotsplanung reagieren können.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit dem hier vorgestellten Ansatz kann dem zuvor konstatierten Mangel an einem übergeordneten Planungsrahmen für die Wärmeplanung begegnet werden. Dies setzt allerdings voraus, dass es eine „Stufe 0“ bei den Planungen auf kommunaler Ebene gibt, die eine gesamtstädtische Betrachtung ermöglicht. Mit Hilfe des Rasteransatzes kann die Planung, die mit diskreten Abgrenzungen arbeitet, unterstützt werden.

Diese Arbeit bietet (s. a. Kap. 1.4.2)

- Ansätze für eine Berücksichtigung der Strategische Wärmeplanung in der kommunalen Planung (s. Kap. 5.1 - 5.3), sowie
- einen Ansatz für eine energetische Raumbewertung (s. Kap. 5.4).

Außerdem verbleibt noch weiterer Forschungsbedarf, der in Kapitel 5.5 umrissen wird.

5.1 Eignungsbereiche als Matrix für die Detailplanung

Die Planungsgewohnheiten in den Kommunen werden mit diesem Ansatz nicht abgelöst, sondern ergänzt. Mit Hilfe der Eignungsbereiche erhalten die Kommunen eine Matrix für die technische Detailplanung, die weiterhin mit diskreten Abgrenzungen arbeiten kann. Neuartig ist, dass mit der Matrix jederzeit der räumliche Kontext eines Plangebietes transparent dargestellt werden kann.

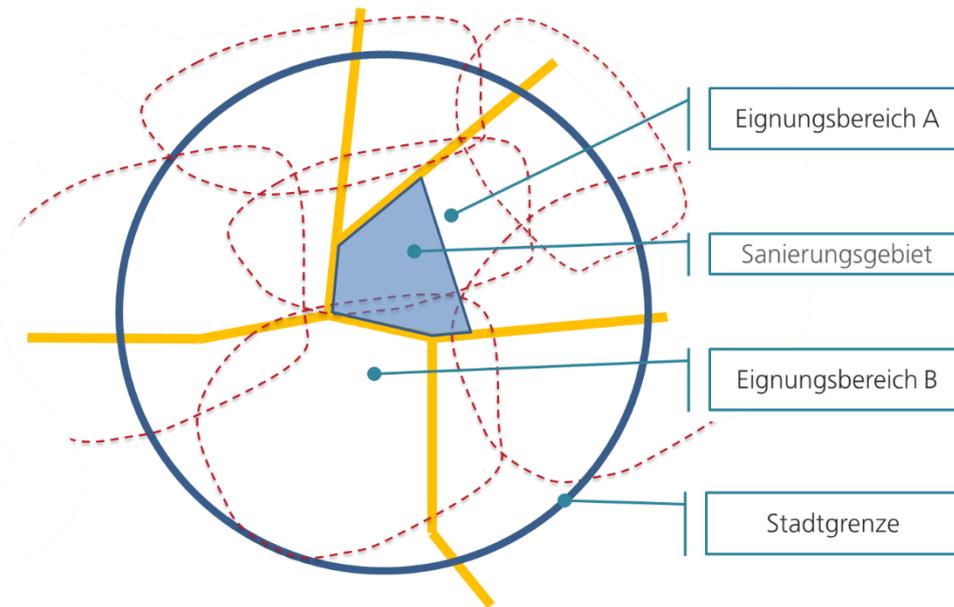


Abb. 29: Modell des Zusammenspiels zwischen Eignungsbereichen und Sanierungsgebiet

Auf Ebene der Detailplanung, z. B. bei der Ausschreibung eines Sanierungsgebietes, erhalten die Planungsbüros einen Rahmen für die zukünftige Gebietsentwicklung, der auch die potentielle Entwicklung in den benachbarten Bereichen berücksichtigt.

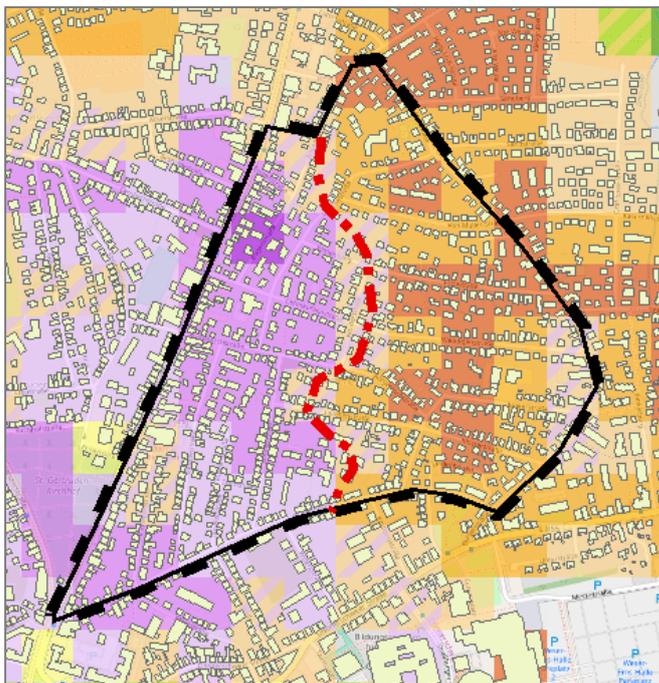


Abb. 30: Eignungsbereiche als Matrix für die Detailplanung (Beispieldarstellung, unmaßstäblich)

So können im Zuge der Detailplanung ungünstige Insellösungen vermieden werden und die technologische Anschlussfähigkeit bei weiteren Entwicklungen in der Umgebung gewährleistet werden.

Die Eignungsbereiche unterstützen die Quartiersabgrenzung für die Erstellung des Energiekonzeptes und ermöglichen eine Gegenprüfung der Detailplanung. Ein wesentlich weitergehender Aspekt besteht darin, dass die Eignungsbereiche nicht nur für die Detailplanung, sondern auch für die Steuerung von Förderung herangezogen werden können, vgl. [12]. So können die jeweiligen Technologien im jeweils geeigneten räumlichen Kontext ihre Stärken entfalten und die Strategische Wärmeplanung unterstützen.

Die räumliche Steuerung von Förderungen ist derzeit gesetzlich nicht vorgesehen, kann aber zur Überwindung der „Policy Resistance“ [54, p. 191] beitragen. Diese tritt ein, wenn verschiedene Akteure unterschiedliche Ziele verfolgen und politische Vorgaben dafür sorgen, dass immer mehr Energie verwendet wird, sich diesen Vorgaben entgegenzustimmen. Im Ergebnis sind alle Akteure damit beschäftigt, Widerstand zu leisten, ihre Ziele werden nicht erreicht und das Gesamtsystem ist für alle unbefriedigend. Eine Lösung ist, die bisherige Widerstandsenergie für gemeinsame Lösungen zu nutzen und, wenn nötig, übergeordnete Ziele zu definieren, an denen sich die Einzelziele der Akteure ausrichten. Im Zuge der Strategischen Wärmeplanung mit den räumlich expliziten Eignungsbereichen werden die übergeordneten Ziele definiert und geordnet.

5.3 Planungsrecht und E-Government

Die bisher skizzierten Aspekte zielen auf eine grundlegende Änderung von Grundlagen ab, die von Kommunen nur indirekt beeinflusst werden können.

Die räumliche Steuerung von Förderungen und die Etablierung einer Energieleitplanung müssen rechtlich verankert werden, um Verwaltungsabläufe etablieren und Zuständigkeiten klären zu können. Die technischen Aspekte können mit Hilfe bestehender Standards theoretisch schon heute abgedeckt werden. In der Publikation P 6 „Ein Entwurf für das Zusammenspiel von E-Government und BIM zur Unterstützung der Wärmewende“ wird eine Prozesskette entworfen, die eine Form der Kommunikation zwischen dem Gebäude, der Förderung und der strategischen Wärmeplanung ermöglicht. So kann langfristig ein Datenpool für die strategische Wärmeplanung entstehen und die räumliche Abstimmung von Fördermaßnahmen unterstützt werden.

5.4 Dynamisierung

Die Wärmebedarfsdaten können entweder von kommerziellen Anbietern regelmäßig bezogen oder mit Hilfe von etablierten Modellierungsansätzen selbst generiert werden. Dies ist von der jeweiligen Ausstattung der kommunalen Verwaltungen bzw. einer möglichen öffentlichen Dienstleistung auf Landkreis-, Bezirks- oder Landesebene für die Kommunen abhängig. Die Ermittlung der Eignungsbereiche kann somit alle 3 bis 5 Jahre erfolgen, um eine energetische Raumbewertung zu ermöglichen. So können aktuelle Entwicklungen regelmäßig überprüft und eingerechnet werden. Mit Hilfe darauf aufbauender Hotspot - Analysen haben Energieversorger die Möglichkeit ihre Angebotsplanungen neu zu justieren. So können auch prognostizierte Baulückenschließung und Neubauaktivitäten im Modell mit einbezogen werden.

5.5 Forschungsbedarf

Die Ausrichtung der Eignungsbereiche ist stark von der aktuellen Diskussion über eine nachhaltige Wärmeversorgung geprägt, bei der eine besondere Rolle den Wärmenetzen

zugesprochen wird. Der Ansatz muss allerdings weiterentwickelt werden und aktuelle Entwicklungen im Bereich der Wasserstofftechnologien berücksichtigen. Im Projekt „power2hydrogen“ der EWE AG geht es um die Nutzung von Überschussstrom zur Gewinnung von Wasserstoff. Neu bei den Überlegungen ist, dass der Wasserstoff über Leitungen in Städte geliefert werden kann, wo er für die verschiedensten Anwendungen genutzt werden kann, auch für die Wärmeversorgung. Das Diffusionsproblem von Wasserstoff in Stahlrohren kann weitestgehend minimiert werden [74], sodass Wasserstoff entweder bis zu den Gebäuden mit Brennstoffzellen oder zu kleineren Kraftwerken mit anschließendem Wärmenetz geleitet werden kann.

Die raumzeitliche Verschiebung der Hotspot-Bereiche verdeutlicht, dass zukünftige Energieinfrastrukturen in der Lage sein müssen, auf Veränderungen (Reduktion des Wärmebedarfs, Änderung des Energieträgers) flexibel reagieren bzw. ineinander transformiert werden zu können. So muss ein heute gebautes Nahwärmenetz in ein zukünftiges LowEx-Netz transformierbar sein, oder ein heutiges Gasnetz kann über eine stufenweise Wasserstoffbeimischung eine Überleitung in ein Wärmepumpenquartier ermöglichen. Die jeweiligen Pfade und Ausgestaltungen sind stark von den lokalen Begebenheiten und Prognosen abhängig.

Die Transformation der Wärmeversorgung ganzer Städte kann nur glücken, wenn die Bedürfnislagen der Menschen berücksichtigt werden und eine sozial ausgewogene Strategie verfolgt wird. Hierzu ist die Einbindung weiterer sozio-ökonomischer Faktoren [72] erforderlich, um Motivationslagen auf Ebene der strategischen Wärmeplanung besser abschätzen zu können.

Auf der Modellierungsebene muss den Randeffekten verstärkt nachgegangen werden, um Eignungsbereiche an Orts(innen)rändern besser abbilden zu können. Ein weiterer Aspekt ist die Berücksichtigung der Prozesswärme. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich die Modellierung des Prozesswärmebedarfs äußerst schwierig darstellt und mit vielen Unsicherheiten behaftet ist [75].

Die oben erwähnten Aspekte werden, bis auf Prozesswärme, im Verbundvorhaben „EnStadt: ENaQ - Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg“ im Teilprojekt 'Von BIM bis zur Energieleitplanung - mehrskalige Planungs- und Informationssysteme für Energetische Nachbarschaftsquartiere' ab 03/2019 vertiefend untersucht, s. a. <https://www.enaq-fliegerhorst.de/>.

LITERATUR

- [1] Fraunhofer IWES/IBP, "Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäude-sektor." Agora, Berlin, p. 96, 2017 [Online]. Available: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf. [Accessed: 01-Sep-2017]
- [2] BMUB, "Klimaschutzplan 2050 - Kabinettsbeschluss vom 14. November 2016," no. November. BMUB, Berlin, p. 91, 2016 [Online]. Available: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf. [Accessed: 15-Nov-2016]
- [3] P. Graichen, F. Peter, and P. Litz, "Das Klimaschutzziel von -40 Prozent bis 2020: Wo landen wir ohne weitere Maßnahmen?," no. 07.09.2017. Agora Energiewende, Berlin, p. 10, 2017 [Online]. Available: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/Kohlekonsens/Agora_Analyse_Klimaschutzziel_2020_07092016.pdf. [Accessed: 13-Dec-2017]
- [4] BMWi, "Energiedaten : Gesamtausgabe," no. Oktober. BMWi, Berlin, p. 76, 2017 [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-grafiken,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. [Accessed: 12-Dec-2017]
- [5] V. Quaschnig, "Sektorkopplung durch die Energiewende." Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, p. 37, 2016 [Online]. Available: <http://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/2016/05/HTW-2016-Sektorkopplungsstudie.pdf>. [Accessed: 21-Oct-2016]
- [6] A. Kirchner, S. Koziel, N. Mayer, and C. Kunz, "Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr," no. April. Agentur für Erneuerbare Energien e.V., p. 23, 2016 [Online]. Available: http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_sektorkopplung_042016/AEE_Metaanalyse_Flexibilitaet_Sektorkopplung_apr16.pdf. [Accessed: 26-Apr-2016]
- [7] A. Münter and F. Osterhage, "Trend Reurbanisierung? Analyse der Binnenwanderungen in Deutschland 2006 bis 2015." Bertelsmann stiftung, Gütersloh, p. 28, 2018 [Online]. Available: https://www.bertelsmannstiftung.de/fileadmin/files/Projekte/74_Wegweiser-Kommune/Reurbanisierung_2018_final.pdf. [Accessed: 26-Nov-2018]
- [8] U. Bigalke, A. Armbruster, F. Lukas, O. Krieger, C. Schuch, and J. Kunde, *dena-Gebäudereport 2016: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Berlin: DENA, 2016.
- [9] BMWi, "Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem klimaneutralen Gebäudebestand." BMWi, Berlin, p. 92, 2015 [Online]. Available: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/energie-effizienz-strategie-gebäude-langfassung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. [Accessed: 12-Dec-2016]

- [10] N. Diefenbach and H. Cischinsky, "Was ist eigentlich die energetische Sanierungsrate?," *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, vol. 7, pp. 51–53, 2015.
- [11] G. Langenbrinck, L. Rensing, L. Wüllner, K. K. Klaus Habermann-Nießé, and L. Rosenau, "KfW-Programm 432 „ Energetische Stadtsanierung – Zuschüsse für integrierte Quartierskonzepte und Sanierungsmanager “ Ergebnisse der Begleitforschung," no. BBSR-Online-Publikation 25/2017. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, p. 98, 2017 [Online]. Available: <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2017/bbsr-online-25-2017-dl.pdf>. [Accessed: 08-May-2018]
- [12] K. Habermann-Nießé, L. Jütting, K. Klehn, and B. Schlomka, "Strategien zur Modernisierung: Mit EKO-Quartieren zu mehr Energieeffizienz; eine Studie," *Band 24 der Schriftenreihe Ökologie*. Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, p. 86, 2012 [Online]. Available: https://www.boell.de/sites/default/files/Endf_Strategien_zur_Moderisierung_2_kommentierbar.pdf. [Accessed: 07-Mar-2018]
- [13] S. Schubert, "Die Rolle räumlicher Planung zur Förderung klimaschonender Wärme- und Kälteversorgung in Deutschland und der Schweiz (Dissertation)," Verlag Dorothea Rohn, Lemgo, 2015.
- [14] H. Hertle, L. Eisenmann, J. Brasche, C. Sager, and M. Schurig, "Die Nutzung von Exergieströmen in kommunalen Strom-Wärme- Systemen zur Erreichung der CO2-Neutralität von Kommunen bis zum Jahr 2050," no. April, 2012.
- [15] R. Riechel, S. Koritkowski, J. Libbe, and M. Koziol, "Wärmewende im Quartier - Hemmnisse bei der Umsetzung am Beispiel energetischer Quartierskonzepte." Difü, Berlin, p. 28, 2016 [Online]. Available: <http://edoc.difu.de/edoc.php?id=FZRP4QJM>. [Accessed: 29-Nov-2016]
- [16] D. Wettstein-Strässle, E. Linder, U. Nyffenegger, and J.-M. Vetter, "Kommunaler Richtplan Energie." Amt für Gemeinden und Raumordnung (AGR); Amt für Umweltkoordination und Energie (AUE), Bern, p. 30, 2011 [Online]. Available: http://www.jgk.be.ch/jgk/de/index/raumplanung/raumplanung/arbeitshilfen/kommunaler_richtplanenergie.assetref/dam/documents/JGK/AGR/de/Raumplanung/Arbeitshilfen/agr_raumplanung_arbeitshilfen_richtplan_energie_de.pdf. [Accessed: 23-May-2018]
- [17] V. Albino, U. Berardi, and R. M. Dangelico, "Smart Cities : Definitions , Dimensions , Performance , and Initiatives," *J. Urban Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 3–21, 2015 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1080/10630732.2014.942092>
- [18] Klima-Bündnis, "Der Smart City-Ansatz." Frankfurt a.M., p. 25, 2015 [Online]. Available: https://www.bundesverband-smart-city.de/ow_userfiles/plugins/forum/attachment_171_563c922fd81ee_563c9224962ec_Smart-Cities-Informationspapier_Klima_Bündnis.pdf. [Accessed: 22-May-2018]
- [19] BSI, "PD 8101:2014 Smart cities – Guide to the role of the planning and development process." BSI Standards Limited 2014, p. 56, 2014 [Online]. Available: http://eu-chinasmartcities.eu/sites/default/files/BSI_guide_to_the_role_of_the_planning_and_development_process.pdf. [Accessed: 23-May-2018]
- [20] T. Kobayashi and S. Ikaruga, "Development of a smart city planning support tool using the cooperative method," *Front. Archit. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 277–284, 2015

- [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2015.09.004>
- [21] J. Knies and S. Schütte, "EnerGeoPlan Grid-aware Planning of Renewable Energies," in *26th International Cartographic Conference*, 2013, p. 17 [Online]. Available: http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2013/_extendedAbstract/128_proceeding.pdf. [Accessed: 08-Sep-2015]
- [22] T. Törnros, G. Sagl, and B. Resch, "Ein GIS-basierter Ansatz zur optimalen Standort-findung für dezentrale Speicher in Energienetzen," in *Angewandte Geoinformatik 2014 - Beiträge zum 26. AGIT-Symposium Salzburg*, 2014, pp. 169–174.
- [23] T. Blaschke, M. Biberacher, I. Schardinger, S. Gadocha, and D. Zocher, "Erneuerbare Energien , räumliche Verfügbarkeit und Nachfrage : Herausforderungen und Chance für Geoinformatik und GIScience," *Geoinformatik 2010*. Kiel, p. 6, 2010.
- [24] J.-B. Eggers and G. Stryi-Hipp, "KomMod as a tool to support municipalities on their way to becoming smart energy cities," in *Sustainable Buildings – Construction Products & Technologies*, 2013, pp. 580–591 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3217/978-3-85125-301-6>
- [25] C. Fieger, C. Steinert, T. Schmid, and R. Burhenne, "Energienutzungsplan für die Stadt Nürnberg - erstellt im Rahmen eines integrierten Klimaschutzkonzeptes Energienutzungsplan," 2011.
- [26] Biedermann, "Energienutzungsplan Augsburg," Augsburg, p. 11, 2013.
- [27] M. Klärle and U. Langendörfer, "Der Energieleitplan – ein Ausblick," in *Erneuerbare Energien unterstützt durch GIS und Landmanagement*, M. Klärle, Ed. Wichmann Verlag, 2012, pp. 137–140.
- [28] M. Hegger, J. Dettmar, and A. Martin, "UrbanReNet - Schlussbericht." Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Darmstadt, p. 273, 2012 [Online]. Available: http://www.ee.architektur.tu-darmstadt.de/media/architektur/fachgruppe_c/ee/forschung_dissertationen_4/ordner/Abschlussbericht_UrbanReNet_I.pdf. [Accessed: 05-Sep-2017]
- [29] M. Hegger and J. Dettmar, *Energetische Stadtraumtypen*. Bonn: Fraunhofer IRB Verlag, 2014.
- [30] A. Koch, "Quod Erat Expectandum: The Modus Operandi of Models and Quantifications," *GI_Forum*, no. 1, pp. 274–290, 2018 [Online]. Available: 10.1553/giscience2018_01_s274
- [31] D. Bläser, "Landkarte der Energiewende - Kommunale Aktivitäten und Ausstattung im Ruhrgebiet," TU Dortmund, Oberhausen, p. 40, 17-Jun-2015 [Online]. Available: http://www.energiewende-ruhr.de/fileadmin/dokumente/Downloads/Vortraege/Vortraege_Zwischenkonferenz/Session_VI/Session_VI_Blaeser_komprimiert.pdf. [Accessed: 02-Dec-2015]
- [32] P. Weichhart, "Humangeographische Forschungsansätze," in *Beiträge zur Didaktik des „Geographie und Wirtschaftskunde“-Unterrichts*, 4., W. Sitte and H. Wohlschlägl, Eds. Wien: Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien, 2006, pp. 182–198.

- [33] U. Wardenga, "Alte und neue Raumkonzepte für den Geographieunterricht," *Geogr. heute*, vol. 23, no. 200, pp. 8–11, 2002.
- [34] R. Bill, *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*, 6. Berlin und Offenbach: Wichmann Verlag, 2016.
- [35] H. H. Blotevogel, "Raum," in *Handwörterbuch der Raumordnung*, 4., E.-H. Ritter, Ed. Hannover: ARL, 2005, pp. 831–841 [Online]. Available: <https://www.arl-net.de/content/handwoerterbuch-der-raumordnung>
- [36] G. Turowski, "Raumplanung," in *Handwörterbuch der Raumordnung*, 4., E.-H. Ritter, Ed. Hannover: ARL, 2005, pp. 893–898 [Online]. Available: <https://www.arl-net.de/content/handwoerterbuch-der-raumordnung>
- [37] M. Lahner and K. Zimmermann, "Integrierte Stadtteilentwicklung: Bedeutung, Zusammenhang und Grenzen von Place-making, Sozialkapital und neue Formen der Local Governance," in *Praxis ohne Theorie?*, S. Greiffenhagen and K. Neller, Eds. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005, pp. 219–250 [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-322-81026-7_14
- [38] L.I.S.T. Stadtentwicklungsgesellschaft mbH, *Handbuch zur Partizipation*, 2. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, 2012 [Online]. Available: https://www.stadtentwicklung.berlin.de/soziale_stadt/partizipation/download/Handbuch_Partizipation.pdf. [Accessed: 27-Nov-2018]
- [39] A. Benz, D. Fürst, H. Kilper, and D. Rehfeld, *Regionalisierung Theorie — Praxis — Perspektiven*, 1st ed. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1999 [Online]. Available: 10.1007/978-3-663-11286-0
- [40] J. Maurer, *Maximen für Planer*, ORL-Schrif. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1995.
- [41] R. Riechel, "Zwischen Gebäude und Gesamtstadt: Das Quartier als Handlungsraum in der lokalen Wärmewende," *Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforsch. - DIW Berlin*, vol. 04, pp. 89–101, 2016 [Online]. Available: <http://ejournals.duncker-humboldt.de/doi/pdf/10.3790/vjh.85.4.89>
- [42] J. R. Weeks, A. Hill, D. Stow, A. Getis, and D. Fugate, "Can we spot a neighborhood from the air? Defining neighborhood structure in Accra, Ghana," *GeoJournal*, vol. 69, no. 1–2, pp. 9–22, 2007 [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2686612/>
- [43] R. Schmidt, *Geschichte der Stadt Eberswalde, Band 2 von 1740–1941*. Hechthausen: dbw Märkischer Kunst- u. Heimatverlag, 1994.
- [44] DWD, "REGNIE – Regionalisierte Niederschlagshöhen," 2018. [Online]. Available: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/regnie/regnie.html?nn=16102&lsbld=603598>. [Accessed: 27-Aug-2018]
- [45] H. Ellenberg, *Vegetation Mitteleuropas*. Stuttgart: UTB Ulmer, 1996.
- [46] R. H. G. Jongmann, C. J. F. ter Braak, and O. F. R. van Tongeren, *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [47] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 3rd ed. New Mexico, USA: Wiley & Sons, 2004 [Online]. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781119994374>

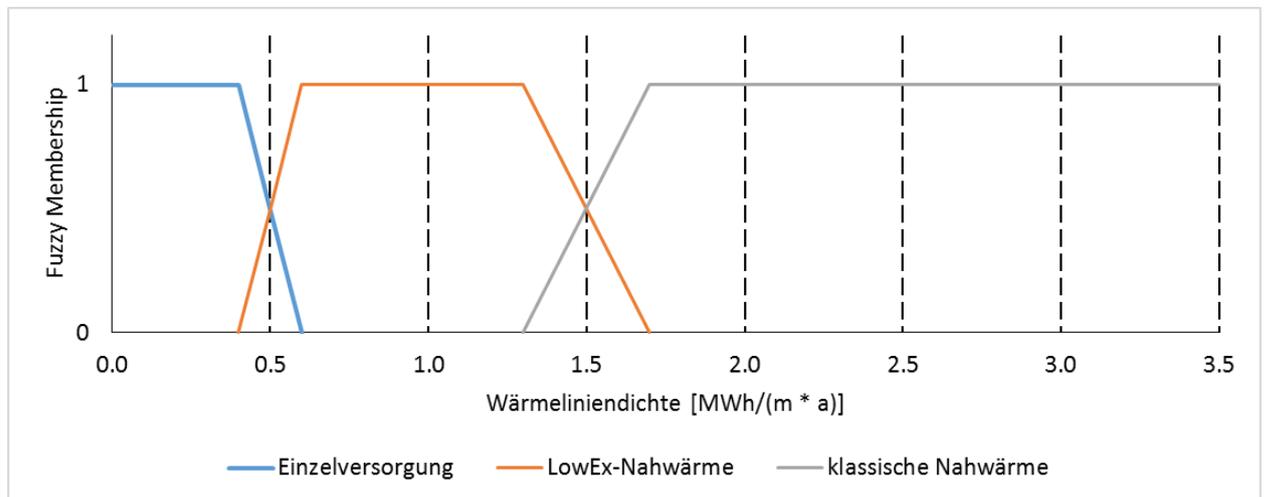
- [48] T. Blaschke, "Unschärfe und GIS: 'Exakte' Planung mit unscharfen Daten?," in *Computergestützte Raumplanung – Beiträge zum Symposium CORP 97*, 1997, pp. 39–50 [Online]. Available: http://realcorp.at/archive/CORP1997_blaschke.pdf. [Accessed: 27-Aug-2018]
- [49] H. Poser, *Wissenschaftstheorie Eine philosophische Einführung*, 2. Stuttgart: Reclam, 2012.
- [50] W. R. Tobler, "A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region," *Econ. Geogr.*, vol. 46, pp. 234–240, 1970 [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/143141>
- [51] S. Psillos, *Scientific Realism*. Milton Park: Routledge, 1999.
- [52] W. Detel, *Grundkurs Philosophie: Band 4 Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie*. Stuttgart: Reclam, 2007.
- [53] T. Thaler, *Kritisch-rationale Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer VS, Wiesbaden, 2017.
- [54] D. H. Meadows, *Thinking in Systems: A Primer*. White River Junction: Chelsea Green Publishing, 2008.
- [55] G. Volker and R. Steven, *Individual-based Modeling and Ecology*. Berlin, Boston: Princeton University Press, 2013 [Online]. Available: <https://www.degruyter.com/view/product/459013>
- [56] V. Rai and A. D. Henry, "Agent-based modelling of consumer energy choices," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 6, no. 6, pp. 556–562, 2016 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2967>
- [57] J. Banks and R. Gibson, "10 rules for determining when simulation is not appropriate.," *IIE Solut.*, vol. 29, no. 9, p. 30, Sep. 1997 [Online]. Available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=9710093105&site=ehost-live>
- [58] J. L. M. Hensen, "Evaluation Through Computational Building Performance Simulation," in *Enhancing Building Performance*, S. Mallory-Hill, W. F. E. Preiser, and C. Watson, Eds. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012, pp. 223–233.
- [59] Menges and Traub, "Sozialpolitik im Klimawandel: Konfliktlinien zwischen sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit.," *Z. Sozialreform*, vol. 58, no. 2012, p. 65, 2012.
- [60] COPLAN AG, "Leitfaden Wärmelandkarte," München, 2012 [Online]. Available: http://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwivt/Publikationen/2014/PDF_F_Leitfaden_Waermelandkarte.pdf. [Accessed: 12-Nov-2014]
- [61] Projektträger Jülich | Forschungszentrum Jülich GmbH, "EnArgus-Wiki: Definition Energieleitplanung." [Online]. Available: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d3450218-2/*/*Energieleitplanung.html?scope=all&search=Energieleitplanung&op=Wiki.get_wiki. [Accessed: 20-Sep-2018]
- [62] G. Meinel, R. Hecht, and H. Herold, "Verfahren zur Erhebung, Analyse und Visualisierung von Gebäudebestands- und Siedlungsentwicklungen auf Grundlage Topographischer Kartenreihen," no. 09. Universität Göttingen, Göttingen, p. 24, 2009 [Online]. Available: https://www2.ioer.de/recherche/pdf/2009_meinel_goettingen.pdf. [Accessed: 21-

Aug-2018]

- [63] H. Seller and I. Peters, "Comparing algorithms for identifying critical heat densities in urban space," in *REAL CORP 2016*, 2016, vol. 2, no. June, pp. 1–12 [Online]. Available: http://www.corp.at/archive/CORP2016_119.pdf. [Accessed: 21-Oct-2016]
- [64] P. Zacharias, "Offene Verwaltungsdaten zur Analyse des Befallspotenzials von Grünlandbeständen mit Schadpflanzen am Beispiel von Kreuzkräutern," *GIS Sci.*, vol. 1, pp. 22–31, 2018.
- [65] V. Wallemacq, A.-F. Marique, and S. Reiter, "Development of an urban typology to assess residential environmental performance at the city scale," *Desing Tools and Methods*, pp. 119–124, 2011.
- [66] A. Field, *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. London: SAGE Publ., 2018.
- [67] K. McGarigal, S. A. Cushman, and E. Ene, "FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst.," 2012. [Online]. Available: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>. [Accessed: 03-Aug-2016]
- [68] W. Li, C. Wu, and S. Zang, "Modeling urban land use conversion of Daqing City, China: a comparative analysis of 'top-down' and 'bottom-up' approaches," *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 28, no. 4, pp. 817–828, 2014 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0671-0>
- [69] A. Mitchell, *The ESRI Guide to GIS Analysis, Vol. 2*. Redlands: Esri Press, 2009.
- [70] Landkreis Osnabrück, "Solardachkataster Landkreis Osnabrück," 2017. [Online]. Available: <https://www.solardachkataster-lkos.de/>. [Accessed: 30-Aug-2017]
- [71] S. Mezger, C. Waldhoff, M. Reckzügel, S. Mezger, and C. Waldhoff, "Projekt PlnA - Informations- und Planungsportal Industrielle Abwärme," 2015. [Online]. Available: <http://www.kompetenzzentrum-energie.de/149.html>. [Accessed: 23-Jun-2015]
- [72] B. Barth, B. B. Flaig, N. Schäuble, M. Tautscher, and Hrsg, *Praxis der Sinus-Milieus*. Wiesbaden: Springer VS, 2018 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-19335-5>
- [73] INeG, "3. Infoveranstaltung Nahwärmeversorgung Venne," 09.07.2014, iNeG, Ostercappeln, pp. 1–27, 2014.
- [74] D. Krieg, "Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff," Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 2012 [Online]. Available: http://juser.fz-juelich.de/record/136392/files/Energie&Umwelt_144.pdf. [Accessed: 02-Oct-2018]
- [75] S. Lehnhoff, A. Claassen, M. Reckzügel, M. Meier, and J. Knies, "Technische und ökonomische Machbarkeit Energetischer Nachbarschaften." Universität Oldenburg, Oldenburg, p. 58, 2016 [Online]. Available: http://en.offis.de/files/Studie_Energetische_Nachbarschaften.pdf. [Accessed: 03-Mar-2016]

ANHANG

A 1 FUZZY MEMBERSHIP

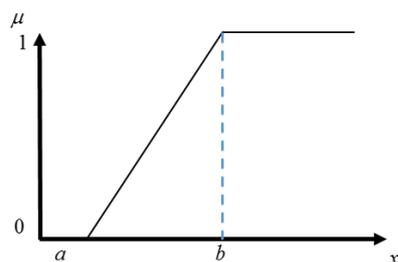


Eine Fuzzymenge μ von X ist eine Funktion von einer Grundmenge X in das reelle Einheitsintervall $[0, 1]$, d.h. $\mu : X \rightarrow [0, 1]$.

Die in der Literatur beschriebenen Grenzwerte zwischen den Versorgungsoptionen (Einzelversorgung / LowEx: 0,5 MWh / (m*a); LowEx / kl. Nahwärme: 1,5 MWh / (m *a)) werden als Orientierungswerte für eine Membership von 0,5 herangezogen. Die weitere fachliche Begründung für die Auswahl der Wertebereiche wird in den Publikationen erläutert.

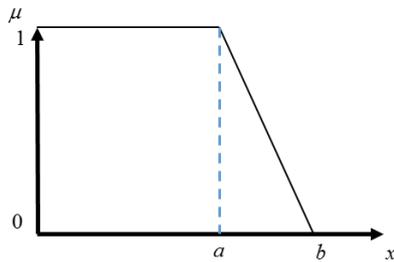
Zur Beschreibung kann eine Dreiecksfunktion herangezogen werden:

Monoton steigend:



$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , \text{wenn } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & , \text{wenn } a \leq x \leq b \\ 1 & , \text{wenn } x > b \end{cases}$$

Monoton fallend:



$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{wenn } x < a \\ \frac{b-x}{b-a} & , \text{wenn } a \leq x \leq b \\ 0 & , \text{wenn } x > b \end{cases}$$

Beschreibung der Fuzzy Membership für Einzelversorgung:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{wenn } x < 0,4 \\ \frac{0,6-x}{0,6-0,4} & , \text{wenn } 0,4 \leq x \leq 0,6 \\ 0 & , \text{wenn } x > 0,6 \end{cases}$$

Beschreibung der Fuzzy Membership für LowEx:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , \text{wenn } x < 0,4 \vee x > 1,7 \\ \frac{x-0,4}{0,6-0,4} & , \text{wenn } 0,4 \leq x \leq 0,6 \\ 1 & , \text{wenn } 0,6 > x < 1,3 \\ \frac{1,7-x}{1,7-1,3} & , \text{wenn } 1,3 \leq x \leq 1,7 \end{cases}$$

Beschreibung der Fuzzy Membership für kl. Nahwärmenetze:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , \text{wenn } x < 1,3 \\ \frac{x-1,3}{1,7-1,3} & , \text{wenn } 1,3 \leq x \leq 1,7 \\ 1 & , \text{wenn } x > 1,7 \end{cases}$$

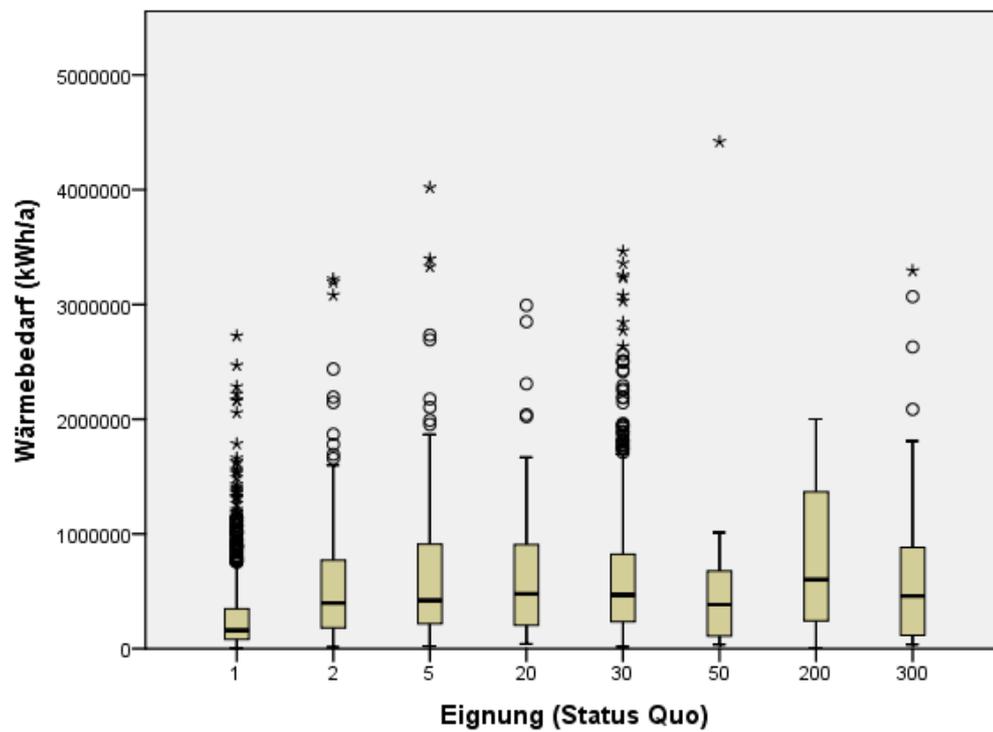
A 2 KRUSKAL-WALLIS - TESTS

A 1.1 Bramsche/Wallenhorst: Test Wärmebedarf (Baublock)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	2288
Test Statistic	394.856 ^a
Degree Of Freedom	7
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.000

a. The test statistic is adjusted for ties.



Pairwise Comparisons of STQ_Eignun

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1 -50	-342.322	177.792	-1.925	.054	1.000
1 -300	-461.901	89.223	-5.177	.000	.000
1 -2	-464.554	54.129	-8.582	.000	.000
1 -5	-554.350	58.009	-9.556	.000	.000
1 -20	-559.619	61.381	-9.117	.000	.000
1 -30	-574.948	31.905	-18.021	.000	.000
1 -200	-609.608	209.951	-2.904	.004	.103
50 -300	-119.579	196.720	-.608	.543	1.000
50 -2	122.231	183.488	.666	.505	1.000
50 -5	212.027	184.670	1.148	.251	1.000
50 -20	217.297	185.757	1.170	.242	1.000
50 -30	232.626	178.202	1.305	.192	1.000
50 -200	-267.286	273.528	-.977	.328	1.000
300 -2	2.653	100.093	.027	.979	1.000
300 -5	92.449	102.244	.904	.366	1.000
300 -20	97.718	104.194	.938	.348	1.000
300 -30	113.047	90.037	1.256	.209	1.000
300 -200	147.707	226.204	.653	.514	1.000
2 -5	-89.796	73.641	-1.219	.223	1.000
2 -20	-95.066	76.325	-1.246	.213	1.000
2 -30	-110.394	55.460	-1.991	.047	1.000
2 -200	-145.054	214.796	-.675	.499	1.000
5 -20	-5.270	79.124	-.067	.947	1.000
5 -30	-20.598	59.254	-.348	.728	1.000
5 -200	-55.258	215.807	-.256	.798	1.000
20 -30	-15.329	62.558	-.245	.806	1.000
20 -200	-49.989	216.738	-.231	.818	1.000
30 -200	-34.660	210.299	-.165	.869	1.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same.

Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

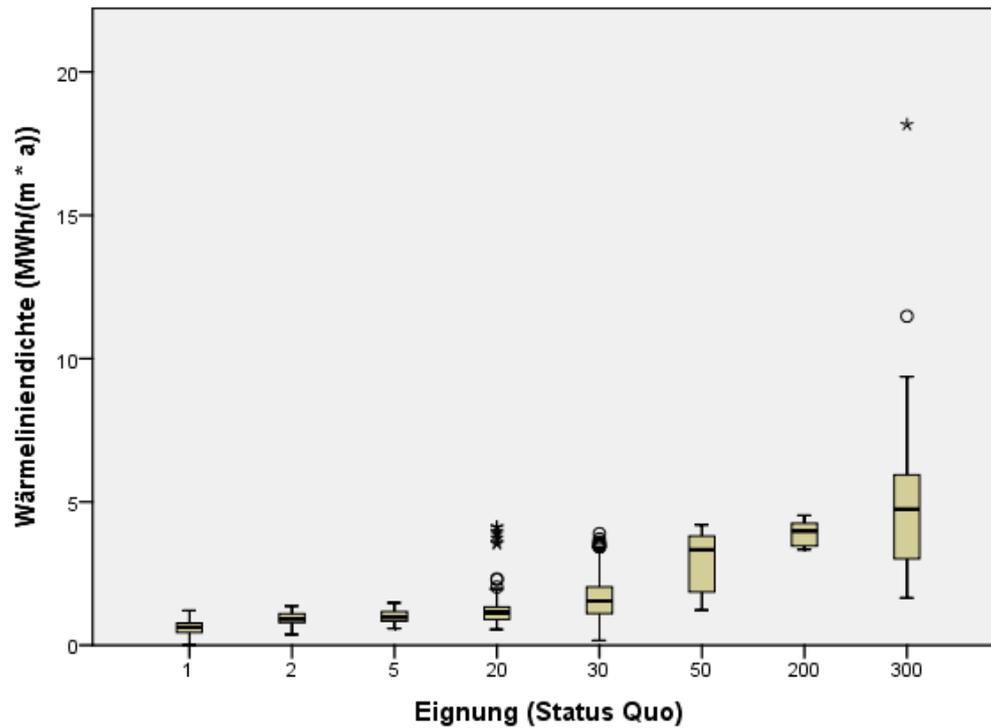
a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

A 1.2 Bramsche/Wallenhorst: Test Wärmelinien-dichte (Baublock)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	2288
Test Statistic	1494.328 ^a
Degree Of Freedom	7
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.000

a. The test statistic is adjusted for ties.



Pairwise Comparisons of STQ_Eignun

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1 -2	-568.847	54.129	-10.509	.000	.000
1 -5	-668.484	58.009	-11.524	.000	.000
1 -20	-850.917	61.381	-13.863	.000	.000
1 -30	-1119.930	31.905	-35.102	.000	.000
1 -50	-1498.144	177.792	-8.426	.000	.000
1 -300	-1626.984	89.223	-18.235	.000	.000
1 -200	-1651.701	209.951	-7.867	.000	.000
2 -5	-99.638	73.641	-1.353	.176	1.000
2 -20	-282.070	76.325	-3.696	.000	.006
2 -30	-551.084	55.460	-9.937	.000	.000
2 -50	-929.297	183.488	-5.065	.000	.000
2 -300	-1058.137	100.093	-10.572	.000	.000
2 -200	-1082.854	214.796	-5.041	.000	.000
5 -20	-182.433	79.124	-2.306	.021	.592
5 -30	-451.446	59.254	-7.619	.000	.000
5 -50	-829.660	184.670	-4.493	.000	.000
5 -300	-958.500	102.244	-9.375	.000	.000
5 -200	-983.217	215.807	-4.556	.000	.000
20 -30	-269.013	62.558	-4.300	.000	.000
20 -50	-647.227	185.757	-3.484	.000	.014
20 -300	-776.067	104.194	-7.448	.000	.000
20 -200	-800.784	216.738	-3.695	.000	.006
30 -50	-378.214	178.202	-2.122	.034	.947
30 -300	-507.053	90.037	-5.632	.000	.000
30 -200	-531.771	210.299	-2.529	.011	.321

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
50 -300	-128.840	196.720	-.655	.513	1.000
50 -200	-153.557	273.528	-.561	.575	1.000
300 -200	24.717	226.204	.109	.913	1.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same.

Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

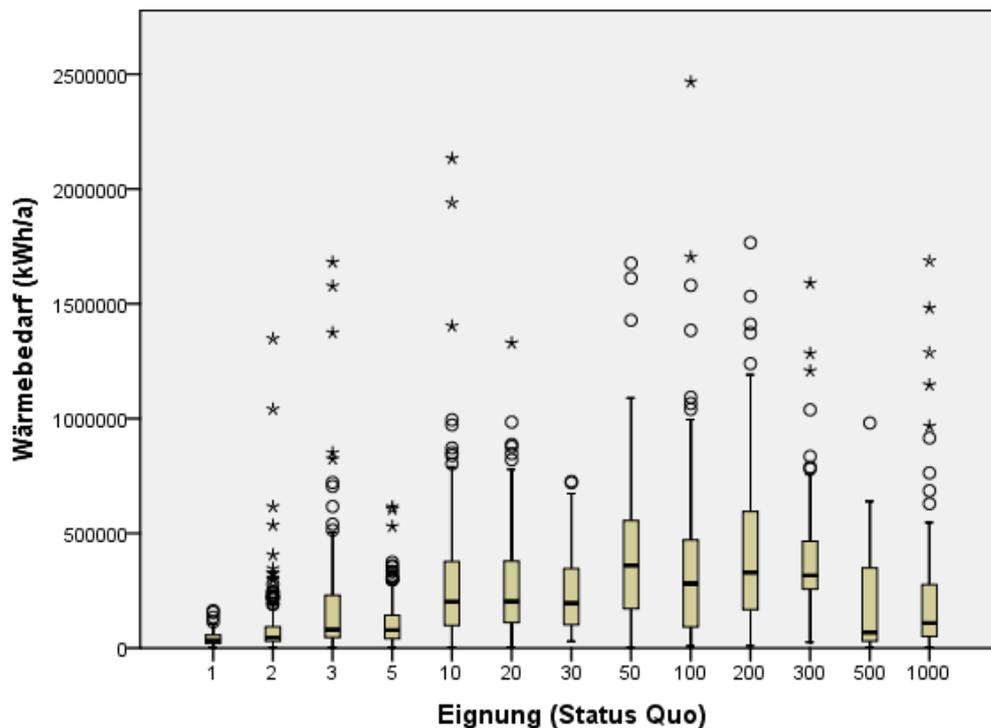
a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

A 1.3 Bramsche/Wallenhorst: Test Wärmebedarf (Raster)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	4270
Test Statistic	925.174 ^a
Degree Of Freedom	12
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.000

a. The test statistic is adjusted for ties.



Pairwise Comparisons of Eignung

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1-2	-430.268	171.681	-2.506	.012	.952
1-5	-664.524	161.582	-4.113	.000	.003
1-3	-969.874	165.226	-5.870	.000	.000
1-500	-1144.264	189.555	-6.037	.000	.000
1-1000	-1264.589	172.346	-7.338	.000	.000
1-30	-1687.203	152.382	-11.072	.000	.000
1-10	-1714.159	150.598	-11.382	.000	.000
1-20	-1795.373	147.675	-12.158	.000	.000
1-100	-1994.459	159.532	-12.502	.000	.000
1-200	-2329.207	159.099	-14.640	.000	.000
1-50	-2411.627	153.683	-15.692	.000	.000
1-300	-2547.617	180.888	-14.084	.000	.000
2-5	-234.256	122.703	-1.909	.056	1.000
2-3	-539.607	127.462	-4.233	.000	.002
2-500	-713.996	157.729	-4.527	.000	.000
2-1000	-834.321	136.566	-6.109	.000	.000
2-30	-1256.935	110.306	-11.395	.000	.000
2-10	-1283.891	107.828	-11.907	.000	.000
2-20	-1365.105	103.707	-13.163	.000	.000
2-100	-1564.191	119.990	-13.036	.000	.000
2-200	-1898.939	119.414	-15.902	.000	.000
2-50	-1981.359	112.096	-17.676	.000	.000
2-300	-2117.349	147.200	-14.384	.000	.000
5-3	305.351	113.495	2.690	.007	.557
5-500	-479.741	146.673	-3.271	.001	.084
5-1000	-600.065	123.632	-4.854	.000	.000
5-30	-1022.679	93.819	-10.901	.000	.000
5-10	-1049.635	90.892	-11.548	.000	.000
5-20	-1130.849	85.963	-13.155	.000	.000
5-100	-1329.936	105.034	-12.662	.000	.000
5-200	-1664.684	104.376	-15.949	.000	.000
5-50	-1747.103	95.917	-18.215	.000	.000
5-300	-1883.094	135.286	-13.919	.000	.000
3-500	-174.390	150.677	-1.157	.247	1.000
3-1000	-294.714	128.357	-2.296	.022	1.000
3-30	-717.328	99.963	-7.176	.000	.000
3-10	-744.285	97.222	-7.656	.000	.000
3-20	-825.499	92.631	-8.912	.000	.000
3-100	-1024.585	110.557	-9.267	.000	.000
3-200	-1359.333	109.932	-12.365	.000	.000
3-50	-1441.753	101.935	-14.144	.000	.000
3-300	-1577.743	139.617	-11.300	.000	.000
500-1000	-120.325	158.453	-.759	.448	1.000
500-30	542.939	136.471	3.978	.000	.005
500-10	569.895	134.476	4.238	.000	.002
500-20	651.109	131.195	4.963	.000	.000
500-100	850.195	144.411	5.887	.000	.000
500-200	1184.943	143.933	8.233	.000	.000
500-50	1267.363	137.922	9.189	.000	.000
500-300	1403.353	167.704	8.368	.000	.000
1000-30	422.614	111.339	3.796	.000	.011
1000-10	449.570	108.884	4.129	.000	.003
1000-20	530.784	104.805	5.065	.000	.000
1000-100	729.870	120.940	6.035	.000	.000
1000-200	1064.618	120.369	8.845	.000	.000
1000-50	1147.038	113.112	10.141	.000	.000

ANHANG
8 - KRUSKAL-WALLIS - TESTS

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1000-300	1283.028	147.975	8.671	.000	.000
30-10	26.956	73.300	.368	.713	1.000
30-20	108.170	67.091	1.612	.107	1.000
30-100	-307.257	90.242	-3.405	.001	.052
30-200	-642.004	89.475	-7.175	.000	.000
30-50	-724.424	79.446	-9.118	.000	.000
30-300	-860.414	124.152	-6.930	.000	.000
10-20	-81.214	62.934	-1.290	.197	1.000
10-100	-280.300	87.196	-3.215	.001	.102
10-200	-615.048	86.401	-7.118	.000	.000
10-50	-697.468	75.967	-9.181	.000	.000
10-300	-833.458	121.956	-6.834	.000	.000
20-100	-199.086	82.045	-2.427	.015	1.000
20-200	-533.834	81.201	-6.574	.000	.000
20-50	-616.254	69.995	-8.804	.000	.000
20-300	-752.244	118.328	-6.357	.000	.000
100-200	-334.748	101.173	-3.309	.001	.073
100-50	417.168	92.422	4.514	.000	.000
100-300	-553.158	132.831	-4.164	.000	.002
200-50	82.420	91.673	.899	.369	1.000
200-300	-218.410	132.311	-1.651	.099	1.000
50-300	-135.990	125.746	-1.081	.279	1.000

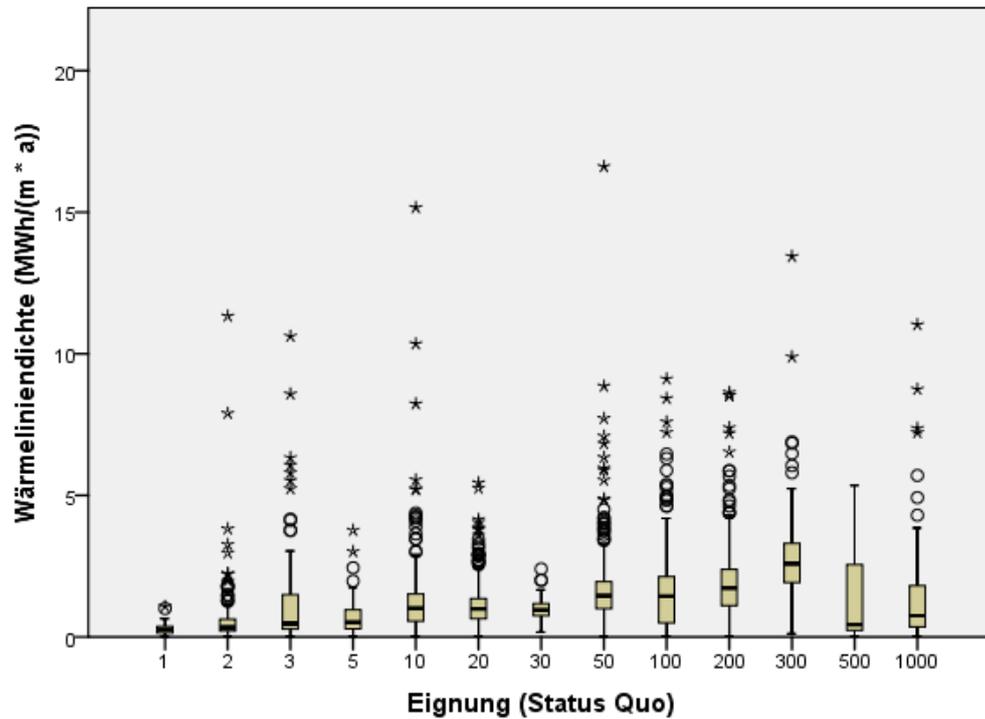
Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.
a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

A 1.4 Bramsche/Wallenhorst: Test Wärmelinien-dichte (Raster)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	4270
Test Statistic	998.069 ^a
Degree Of Freedom	12
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.000

a. The test statistic is adjusted for ties.



Pairwise Comparisons of Eignung

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1-2	-543.589	171.681	-3.166	.002	.120
1-5	-762.335	161.582	-4.718	.000	.000
1-3	-1091.593	165.226	-6.607	.000	.000
1-1000	-1470.025	172.346	-8.530	.000	.000
1-30	-1510.558	152.382	-9.913	.000	.000
1-500	-1560.392	189.555	-8.232	.000	.000
1-20	-1597.192	147.675	-10.816	.000	.000
1-10	-1629.357	150.598	-10.819	.000	.000
1-100	-2020.591	159.532	-12.666	.000	.000
1-50	-2330.063	153.683	-15.162	.000	.000
1-200	-2523.557	159.099	-15.862	.000	.000
1-300	-3320.916	180.888	-18.359	.000	.000
2-5	-218.746	122.703	-1.783	.075	1.000
2-3	-548.004	127.462	-4.299	.000	.001
2-1000	-926.436	136.566	-6.784	.000	.000
2-30	-966.969	110.306	-8.766	.000	.000
2-500	-1016.803	157.729	-6.447	.000	.000
2-20	-1053.603	103.707	-10.159	.000	.000
2-10	-1085.768	107.828	-10.069	.000	.000
2-100	-1477.002	119.990	-12.309	.000	.000
2-50	-1786.474	112.096	-15.937	.000	.000
2-200	-1979.968	119.414	-16.581	.000	.000
2-300	-2777.326	147.200	-18.868	.000	.000
5-3	329.258	113.495	2.901	.004	.290
5-1000	-707.690	123.632	-5.724	.000	.000
5-30	-748.223	93.819	-7.975	.000	.000
5-500	-798.057	146.673	-5.441	.000	.000
5-20	-834.857	85.963	-9.712	.000	.000

ANHANG
10 - KRUSKAL-WALLIS - TESTS

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
5-10	-867.022	90.892	-9.539	.000	.000
5-100	-1258.256	105.034	-11.980	.000	.000
5-50	-1567.728	95.917	-16.345	.000	.000
5-200	-1761.222	104.376	-16.874	.000	.000
5-300	-2558.580	135.286	-18.912	.000	.000
3-1000	-378.432	128.357	-2.948	.003	.249
3-30	-418.965	99.963	-4.191	.000	.002
3-500	-468.799	150.677	-3.111	.002	.145
3-20	-505.599	92.631	-5.458	.000	.000
3-10	-537.765	97.222	-5.531	.000	.000
3-100	-928.998	110.557	-8.403	.000	.000
3-50	-1238.470	101.935	-12.150	.000	.000
3-200	-1431.964	109.932	-13.026	.000	.000
3-300	-2229.323	139.617	-15.967	.000	.000
1000-30	40.533	111.339	.364	.716	1.000
1000-500	90.367	158.453	.570	.568	1.000
1000-20	127.167	104.805	1.213	.225	1.000
1000-10	159.333	108.884	1.463	.143	1.000
1000-100	550.566	120.940	4.552	.000	.000
1000-50	860.038	113.112	7.603	.000	.000
1000-200	1053.532	120.369	8.753	.000	.000
1000-300	1850.891	147.975	12.508	.000	.000
30-500	-49.834	136.471	-.365	.715	1.000
30-20	86.634	67.091	1.291	.197	1.000
30-10	118.799	73.300	1.621	.105	1.000
30-100	-510.033	90.242	-5.652	.000	.000
30-50	-819.505	79.446	-10.315	.000	.000
30-200	-1012.998	89.475	-11.322	.000	.000
30-300	-1810.357	124.152	-14.582	.000	.000
500-20	36.800	131.195	.280	.779	1.000
500-10	68.965	134.476	.513	.608	1.000
500-100	460.199	144.411	3.187	.001	.112
500-50	769.671	137.922	5.580	.000	.000
500-200	963.165	143.933	6.692	.000	.000
500-300	1760.523	167.704	10.498	.000	.000
20-10	32.165	62.934	.511	.609	1.000
20-100	-423.399	82.045	-5.161	.000	.000
20-50	-732.871	69.995	-10.470	.000	.000
20-200	-926.365	81.201	-11.408	.000	.000
20-300	-1723.724	118.328	-14.567	.000	.000
10-100	-391.234	87.196	-4.487	.000	.001
10-50	-700.706	75.967	-9.224	.000	.000
10-200	-894.199	86.401	-10.349	.000	.000
10-300	-1691.558	121.956	-13.870	.000	.000
100-50	309.472	92.422	3.348	.001	.063
100-200	-502.966	101.173	-4.971	.000	.000
100-300	-1300.324	132.831	-9.789	.000	.000
50-200	-193.493	91.673	-2.111	.035	1.000
50-300	-990.852	125.746	-7.880	.000	.000
200-300	-797.359	132.311	-6.026	.000	.000

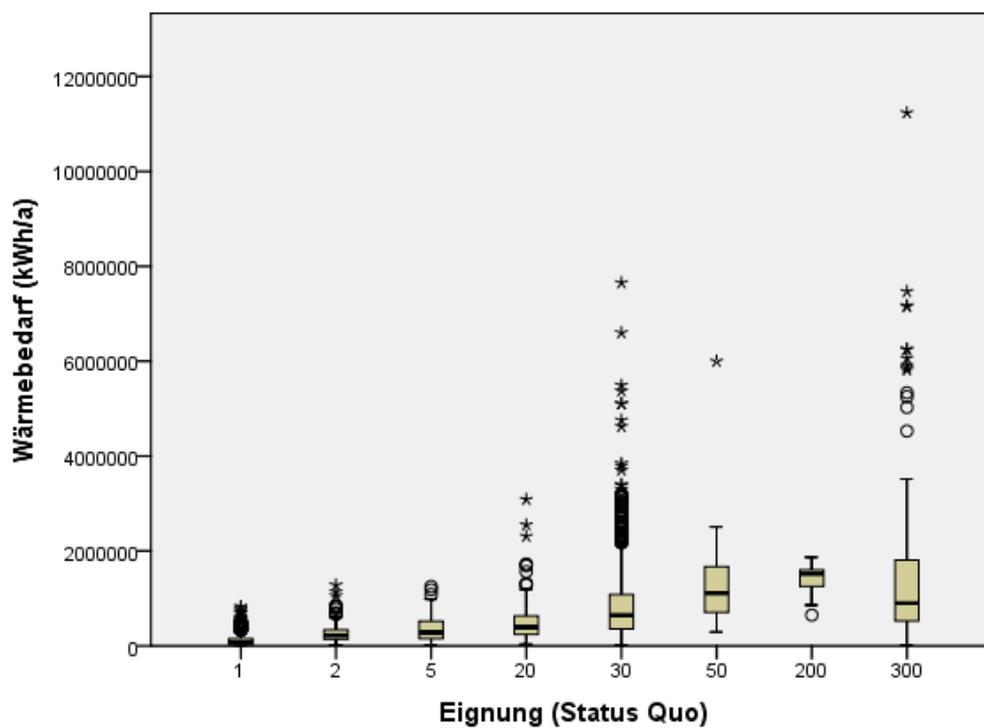
Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.
a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

A 1.5 Oldenburg: Test Wärmebedarf (Baublock)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	2883
Test Statistic	1543.134 ^a
Degree Of Freedom	7
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.000

a. The test statistic is adjusted for ties.



Pairwise Comparisons of STQ_Eignun

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1-2	-549.495	70.503	-7.794	.000	.000
1-5	-761.483	72.222	-10.544	.000	.000
1-20	-1002.471	69.786	-14.365	.000	.000
1-30	-1326.425	35.653	-37.204	.000	.000
1-300	-1499.110	82.931	-18.077	.000	.000
1-50	-1797.881	165.515	-10.862	.000	.000
1-200	-1934.255	278.806	-6.938	.000	.000
2-5	-211.988	93.247	-2.273	.023	.644
2-20	-452.976	91.374	-4.957	.000	.000
2-30	-776.929	68.922	-11.273	.000	.000
2-300	-949.614	101.767	-9.331	.000	.000
2-50	-1248.386	175.710	-7.105	.000	.000
2-200	-1384.759	284.976	-4.859	.000	.000

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
5-20	-240.988	92.706	-2.599	.009	.261
5-30	-564.941	70.679	-7.993	.000	.000
5-300	-737.626	102.965	-7.164	.000	.000
5-50	-1036.397	176.407	-5.875	.000	.000
5-200	-1172.771	285.407	-4.109	.000	.001
20-30	-323.954	68.188	-4.751	.000	.000
20-300	-496.639	101.272	-4.904	.000	.000
20-50	-795.410	175.424	-4.534	.000	.000
20-200	-931.784	284.800	-3.272	.001	.030
30-300	-172.685	81.590	-2.116	.034	.960
30-50	-471.456	164.847	-2.860	.004	.119
30-200	-607.830	278.410	-2.183	.029	.813
300-50	298.771	181.055	1.650	.099	1.000
300-200	435.145	288.303	1.509	.131	1.000
50-200	-136.374	321.925	-.424	.672	1.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same.

Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

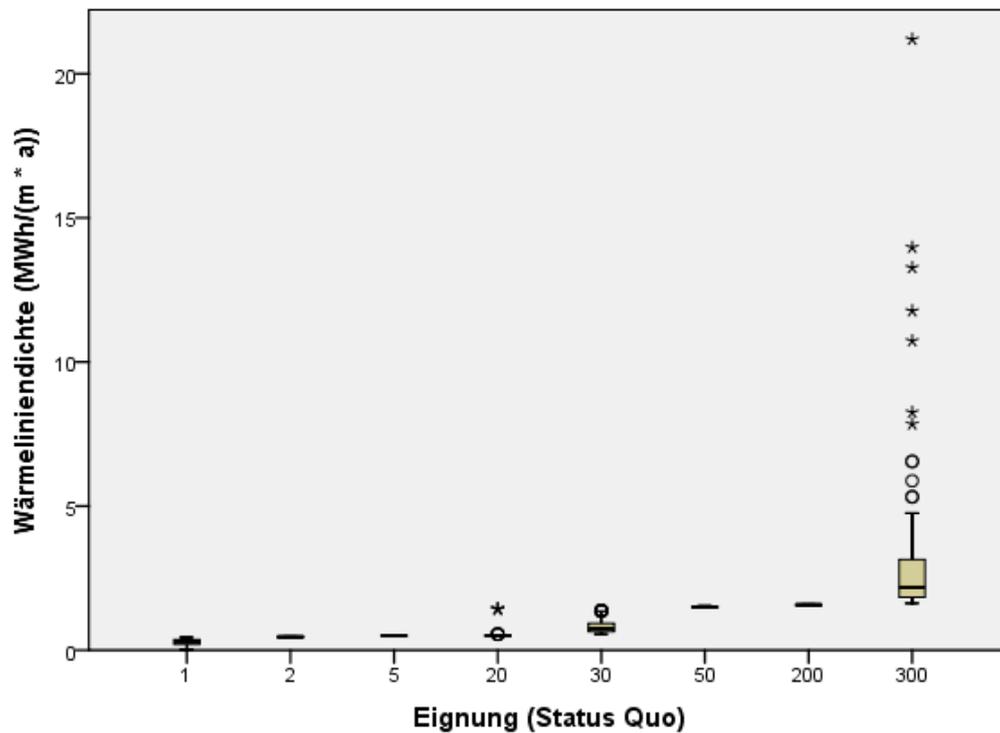
a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

A 1.6 Oldenburg: Test Wärmeliniendichte (Baublock)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	2883
Test Statistic	2495.683 ^a
Degree Of Freedom	7
Asymptotic Sig. (2-sided test)	.000

a. The test statistic is adjusted for ties.



Pairwise Comparisons of STQ_Eignun

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1-2	-546.500	70.503	-7.751	.000	.000
1-5	-783.500	72.222	-10.848	.000	.000
1-20	-819.551	69.786	-11.744	.000	.000
1-30	-1608.000	35.653	-45.101	.000	.000
1-50	-2283.500	165.515	-13.796	.000	.000
1-200	-2301.000	278.806	-8.253	.000	.000
1-300	-2362.000	82.931	-28.482	.000	.000
2-5	-237.000	93.247	-2.542	.011	.309
2-20	-273.051	91.374	-2.988	.003	.079
2-30	-1061.500	68.922	-15.402	.000	.000
2-50	-1737.000	175.710	-9.886	.000	.000
2-200	-1754.500	284.977	-6.157	.000	.000
2-300	-1815.500	101.767	-17.840	.000	.000
5-20	-36.051	92.706	-.389	.697	1.000
5-30	-824.500	70.679	-11.665	.000	.000
5-50	-1500.000	176.407	-8.503	.000	.000
5-200	-1517.500	285.407	-5.317	.000	.000
5-300	-1578.500	102.965	-15.330	.000	.000
20-30	-788.449	68.188	-11.563	.000	.000
20-50	-1463.949	175.424	-8.345	.000	.000
20-200	-1481.449	284.800	-5.202	.000	.000
20-300	-1542.449	101.272	-15.231	.000	.000
30-50	-675.500	164.847	-4.098	.000	.001
30-200	-693.000	278.410	-2.489	.013	.359
30-300	-754.000	81.590	-9.241	.000	.000

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
50-200	-17.500	321.926	-.054	.957	1.000
50-300	-78.500	181.055	-.434	.665	1.000
200-300	-61.000	288.303	-.212	.832	1.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same.

Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

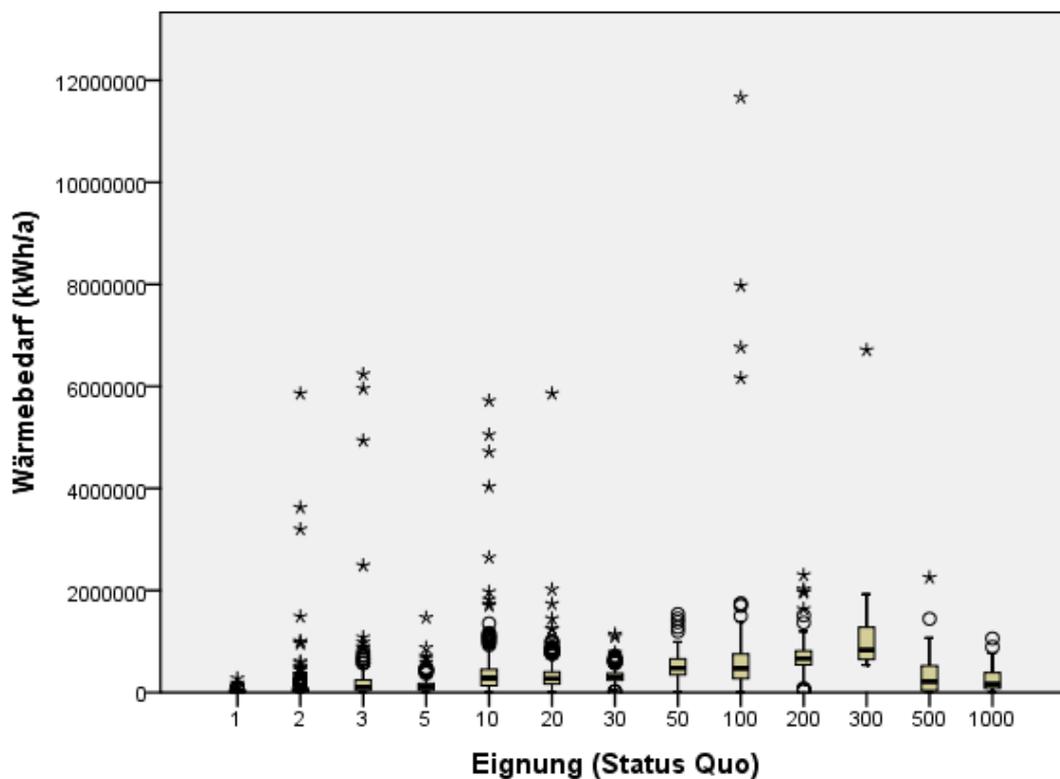
a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

A 1.7 Oldenburg: Test Wärmebedarf (Raster)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	5640
Test Statistic	2026.080 ^a
Degree Of Freedom	12
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.000

a. The test statistic is adjusted for ties.



Pairwise Comparisons of Eignung

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1-2	-507.401	140.126	-3.621	.000	.023
1-5	-1027.390	129.595	-7.928	.000	.000
1-3	-1485.454	159.147	-9.334	.000	.000
1-1000	-2079.940	194.485	-10.695	.000	.000
1-500	-2298.271	327.139	-7.025	.000	.000
1-20	-2615.513	118.157	-22.136	.000	.000
1-10	-2633.194	125.888	-20.917	.000	.000
1-30	-2929.883	119.769	-24.463	.000	.000
1-100	-3610.958	167.669	-21.536	.000	.000
1-50	-3926.744	167.669	-23.420	.000	.000
1-200	-4436.052	206.057	-21.528	.000	.000
1-300	-4953.574	526.743	-9.404	.000	.000
2-5	-519.989	108.477	-4.794	.000	.000
2-3	-978.053	142.479	-6.865	.000	.000
2-1000	-1572.539	181.099	-8.683	.000	.000
2-500	-1790.870	319.362	-5.608	.000	.000
2-20	-2108.112	94.516	-22.304	.000	.000
2-10	-2125.793	104.019	-20.436	.000	.000
2-30	-2422.482	96.524	-25.097	.000	.000
2-100	-3103.557	151.938	-20.426	.000	.000
2-50	-3419.343	151.938	-22.505	.000	.000
2-200	-3928.651	193.473	-20.306	.000	.000
2-300	-4446.174	521.949	-8.518	.000	.000
5-3	458.064	132.136	3.467	.001	.041
5-1000	-1052.550	173.079	-6.081	.000	.000
5-500	-1270.881	314.883	-4.036	.000	.004
5-20	-1588.123	78.057	-20.346	.000	.000
5-10	-1605.804	89.329	-17.976	.000	.000
5-30	-1902.493	80.477	-23.640	.000	.000
5-100	-2583.568	142.284	-18.158	.000	.000
5-50	-2899.354	142.284	-20.377	.000	.000
5-200	-3408.662	185.988	-18.327	.000	.000
5-300	-3926.184	519.221	-7.562	.000	.000
3-1000	-594.485	196.187	-3.030	.002	.191
3-500	-812.817	328.153	-2.477	.013	1.000
3-20	-1130.059	120.938	-9.344	.000	.000
3-10	-1147.739	128.502	-8.932	.000	.000
3-30	-1444.428	122.513	-11.790	.000	.000
3-100	-2125.504	169.640	-12.529	.000	.000
3-50	-2441.290	169.640	-14.391	.000	.000
3-200	-2950.597	207.664	-14.208	.000	.000
3-300	-3468.120	527.374	-6.576	.000	.000
1000-500	218.331	346.671	.630	.529	1.000
1000-20	535.573	164.689	3.252	.001	.089
1000-10	553.254	170.321	3.248	.001	.091
1000-30	849.943	165.850	5.125	.000	.000
1000-100	1531.019	203.161	7.536	.000	.000
1000-50	1846.804	203.161	9.090	.000	.000
1000-200	2356.112	235.841	9.990	.000	.000
1000-300	2873.635	539.092	5.331	.000	.000
500-20	317.242	310.351	1.022	.307	1.000
500-10	334.923	313.376	1.069	.285	1.000
500-30	631.612	310.968	2.031	.042	1.000
500-100	1312.688	332.370	3.949	.000	.006
500-50	1628.473	332.370	4.900	.000	.000

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
500-200	2137.781	353.293	6.051	.000	.000
500-300	2655.304	599.846	4.427	.000	.001
20-10	17.681	71.734	.246	.805	1.000
20-30	-314.370	60.354	-5.209	.000	.000
20-100	-995.445	131.950	-7.544	.000	.000
20-50	-1311.231	131.950	-9.937	.000	.000
20-200	-1820.539	178.207	-10.216	.000	.000
20-300	-2338.061	516.485	-4.527	.000	.000
10-30	-296.689	74.360	-3.990	.000	.005
10-100	-977.765	138.916	-7.039	.000	.000
10-50	-1293.550	138.916	-9.312	.000	.000
10-200	-1802.858	183.424	-9.829	.000	.000
10-300	-2320.381	518.308	-4.477	.000	.001
30-100	-681.076	133.396	-5.106	.000	.000
30-50	-996.861	133.396	-7.473	.000	.000
30-200	-1506.169	179.280	-8.401	.000	.000
30-300	-2023.692	516.856	-3.915	.000	.007
100-50	315.786	177.659	1.777	.075	1.000
100-200	-825.093	214.265	-3.851	.000	.009
100-300	-1342.616	530.008	-2.533	.011	.882
50-200	-509.308	214.265	-2.377	.017	1.000
50-300	-1026.830	530.008	-1.937	.053	1.000
200-300	-517.523	543.374	-.952	.341	1.000

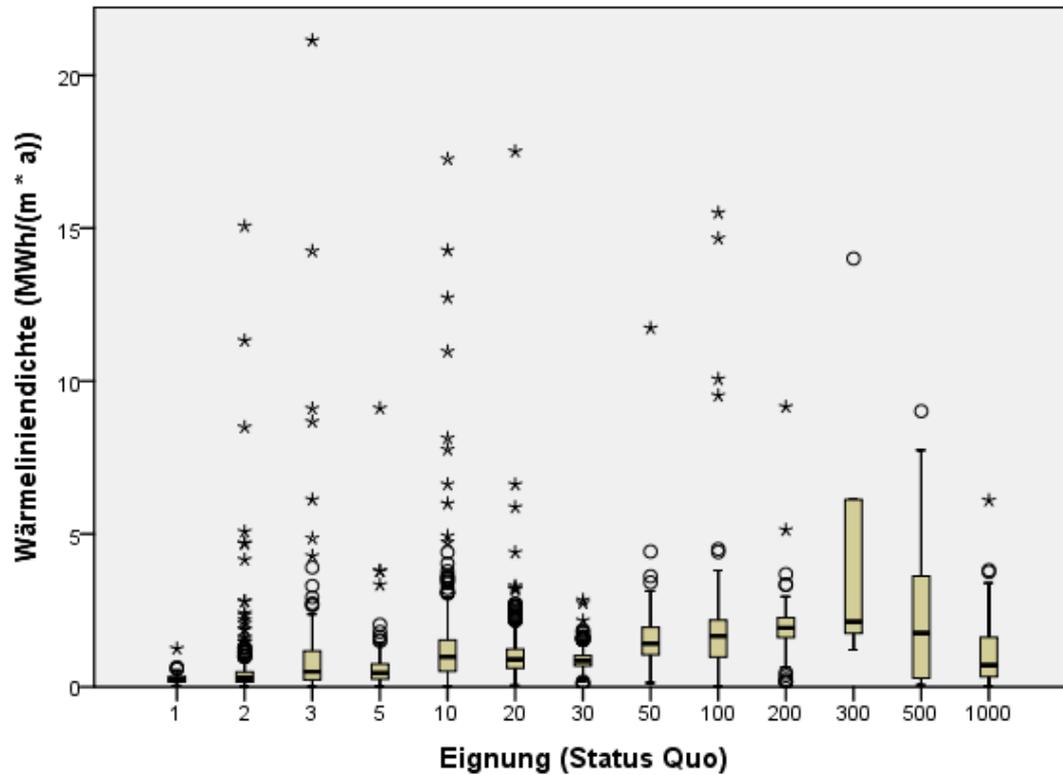
Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.
a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

A 1.8 Oldenburg: Test Wärmeliniendichte (Raster)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	5419
Test Statistic	1452.843 ^a
Degree Of Freedom	12
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.000

a. The test statistic is adjusted for ties.



Pairwise Comparisons of Eignung

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
1-2	-526.510	138.530	-3.801	.000	.011
1-5	-955.722	128.619	-7.431	.000	.000
1-3	-1510.667	155.865	-9.692	.000	.000
1-1000	-2037.300	189.419	-10.756	.000	.000
1-30	-2196.690	118.546	-18.530	.000	.000
1-20	-2268.108	117.051	-19.377	.000	.000
1-500	-2349.163	320.574	-7.328	.000	.000
1-10	-2388.309	124.123	-19.241	.000	.000
1-100	-3374.607	163.358	-20.658	.000	.000
1-50	-3473.679	163.358	-21.264	.000	.000
1-200	-3941.077	199.825	-19.723	.000	.000
1-300	-4377.841	506.828	-8.638	.000	.000
2-5	-429.212	107.238	-4.002	.000	.005
2-3	-984.157	138.748	-7.093	.000	.000
2-1000	-1510.790	175.604	-8.603	.000	.000
2-30	-1670.180	94.923	-17.595	.000	.000
2-20	-1741.598	93.049	-18.717	.000	.000
2-500	-1822.653	312.610	-5.830	.000	.000
2-10	-1861.799	101.802	-18.288	.000	.000
2-100	-2848.097	147.115	-19.360	.000	.000
2-50	-2947.169	147.115	-20.033	.000	.000
2-200	-3414.567	186.782	-18.281	.000	.000
2-300	-3851.331	501.829	-7.675	.000	.000
5-3	554.945	128.853	4.307	.000	.001
5-1000	-1081.578	167.896	-6.442	.000	.000

ANHANG
18 - KRUSKAL-WALLIS - TESTS

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
5-30	-1240.968	79.765	-15.558	.000	.000
5-20	-1312.386	77.525	-16.928	.000	.000
5-500	-1393.441	308.346	-4.519	.000	.000
5-10	-1432.587	87.839	-16.309	.000	.000
5-100	-2418.885	137.822	-17.551	.000	.000
5-50	-2517.957	137.822	-18.270	.000	.000
5-200	-2985.355	179.553	-16.627	.000	.000
5-300	-3422.119	499.184	-6.855	.000	.000
3-1000	-526.633	189.578	-2.778	.005	.427
3-30	-686.023	118.800	-5.775	.000	.000
3-20	-757.441	117.308	-6.457	.000	.000
3-500	-838.496	320.668	-2.615	.009	.696
3-10	-877.642	124.366	-7.057	.000	.000
3-100	-1863.940	163.542	-11.397	.000	.000
3-50	-1963.012	163.542	-12.003	.000	.000
3-200	-2430.410	199.976	-12.154	.000	.000
3-300	-2867.174	506.888	-5.656	.000	.000
1000-30	159.390	160.310	.994	.320	1.000
1000-20	230.808	159.208	1.450	.147	1.000
1000-500	311.863	338.252	.922	.357	1.000
1000-10	351.009	164.477	2.134	.033	1.000
1000-100	1337.307	195.785	6.830	.000	.000
1000-50	1436.379	195.785	7.337	.000	.000
1000-200	1903.777	227.104	8.383	.000	.000
1000-300	2340.541	518.190	4.517	.000	.000
30-20	71.418	59.334	1.204	.229	1.000
30-500	-152.473	304.282	-.501	.616	1.000
30-10	191.619	72.292	2.651	.008	.627
30-100	-1177.917	128.473	-9.169	.000	.000
30-50	-1276.989	128.473	-9.940	.000	.000
30-200	-1744.387	172.481	-10.113	.000	.000
30-300	-2181.151	496.684	-4.391	.000	.001
20-500	-81.055	303.703	-.267	.790	1.000
20-10	120.201	69.814	1.722	.085	1.000
20-100	-1106.500	127.095	-8.706	.000	.000
20-50	-1205.571	127.095	-9.486	.000	.000
20-200	-1672.969	171.457	-9.757	.000	.000
20-300	-2109.733	496.329	-4.251	.000	.002
500-10	39.146	306.498	.128	.898	1.000
500-100	1025.444	324.376	3.161	.002	.123
500-50	1124.516	324.376	3.467	.001	.041
500-200	1591.914	344.187	4.625	.000	.000
500-300	2028.678	579.145	3.503	.000	.036
10-100	-986.298	133.636	-7.380	.000	.000
10-50	-1085.370	133.636	-8.122	.000	.000
10-200	-1552.768	176.361	-8.804	.000	.000
10-300	-1989.532	498.044	-3.995	.000	.005
100-50	99.071	170.698	.580	.562	1.000
100-200	-566.470	205.870	-2.752	.006	.463
100-300	-1003.233	509.242	-1.970	.049	1.000
50-200	-467.398	205.870	-2.270	.023	1.000
50-300	-904.162	509.242	-1.776	.076	1.000
200-300	-436.764	522.084	-.837	.403	1.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.
a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

A 3 PUBLIKATIONEN

Nr.	Bibliographische Angaben der Publikation	Review
P 1	J. Knies, "The aspect of space in future energy systems," in Sustainable Built Environment Conference 2016 in Hamburg: Strategies, Stakeholders, Success factors, 2016, pp. 1226–1235 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000051699	Double - Blind
P 2	J. Knies, "Shaping Energetic Neighbourhoods : A Dynamic Approach For A Future Proof Urban Energy Planning," in World Sustainable Built Environment Conference, 2017, no. June, pp. 1870–1875 [Online]. Available: http://www.wsbe17hongkong.hk/download/WSBE17 Hong Kong - Conference Proceedings.pdf . [Accessed: 05-Nov-2018]	Double - Blind
P 3	J. Knies, "Räumliche Integration industrieller Abwärme in zukünftige Wärmeversorgungsoptionen," Agit – J. für Angew. Geoinformatik, vol. 3, pp. 98–108, Jul. 2017 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.14627/537633011	Double - Blind
P 4	J. Knies, "A spatial approach for future-oriented heat planning in urban areas," Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag., vol. 16, pp. 3–30, 2018 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.5278/ijsepm.2018.16.2	Single - Blind
P 5	J. Knies, "Einzelentscheidungen im Kontext einer kommunalen Wärmeplanung – ein Modellansatz," Agit – J. für Angew. Geoinformatik, vol. 4, pp. 102–113, 2018 [Online]. Available: http://www.doi.org/10.14627/537647013	Double - Blind
P 6	J. Knies, "Ein Entwurf für das Zusammenspiel von E-Government und BIM zur Unterstützung der Wärmewende," ZFV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinf. und Landmanagement, vol. 6, pp. 397–401, 2018 [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.12902/zfv-0234-2018	Single - Blind