

AUTOMATISIERTE CLUSTERUNG VON SIEDLUNGSFLÄCHEN ZUR BILDUNG VON TYPQUARTIEREN

Timo Mayregger^{1*}, Eva Gfesser², Maximilian Riedel³,
Nicole Barton¹, Steffen Schlinkert^{4*}, Markus Zdrallek¹

¹Bergische Universität Wuppertal, Rainer-Gruenter-Str. 21, 42119 Wuppertal,
+49 202 439-1632, tmayregger@uni-wuppertal.de, <https://www.evt.uni-wuppertal.de>

²A4I Leipzig GmbH, Hainstraße 16, 04109 Leipzig

³Energieforen Leipzig GmbH, Hainstraße 16, 04109 Leipzig

⁴Stadtwerke Herne AG, Grenzweg 18, 44623 Herne

Kurzfassung: Mithilfe der vorgestellten Methode können durch georeferenzierte Daten, beliebige Städte oder ein Städteverbund automatisiert in Typquartiere eingeteilt werden. Als Datengrundlage werden Siedlungsflächendaten [1], gebäudespezifische georeferenzierte Daten [2] und adressscharfe Haushalts- und Einwohnerdaten [3] verwendet. In der vorliegenden Analyse werden die Daten für die Städte Ulm, Neu-Ulm, Münster und Herne genutzt und ganzheitlich geclustert. Die heterogene Struktur der genannten Städte ermöglicht eine möglichst repräsentative Datenbasis, sodass die gebildeten Typquartiere auch auf andere deutsche Städte übertragbar sind. Für die Clusterung wird der k-Means-Algorithmus verwendet. Dies schafft eine wissenschaftlich fundierte Grundlage zur Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit von Maßnahmen zwischen strukturell ähnlichen Typquartieren und erleichtert so die Entwicklung robuster Transformationsstrategien.

Keywords: Clusterung, strategische Planung, Typquartiere

1 Einleitung

Die Dekarbonisierung des Wärmesektors ist entscheidend für die Erreichung der Klimaneutralität. Dabei nehmen Wärmenetze eine zunehmend bedeutende Rolle ein und müssen gleichzeitig ausgebaut und flexibilisiert werden. Parallel erfordert die Umstellung auf Wärmepumpen sowie der Ausbau von Ladeinfrastruktur eine stärkere Elektrifizierung und belastet das Stromnetz zusätzlich. Mit sinkendem Gasverbrauch steigt zudem der Anpassungsdruck auf bestehende Gasnetze. Die zukünftige Energieversorgung wird komplexer und muss Synergien zwischen Strom-, Wärme-, Gas- und gegebenenfalls Wasserstoffinfrastruktur nutzen. Besonders auf Quartiersebene entstehen neue Herausforderungen, da Erzeugung, Verteilung und Verbrauch räumlich eng verknüpft sind. Da Szenarien sich stetig weiterentwickeln und je nach Quartier unterschiedlich ausfallen, hilft eine Clusterung von Stadtgebieten in Typquartiere, um Planungen zu vereinfachen und strategische Transformationspfade abzuleiten.

Eine allgemeingültige Definition des Begriffes des Quartiers ist bislang nicht durchgesetzt, da unterschiedliche Disziplinen verschiedene Kriterien zur Abgrenzung heranziehen [4]. Es können beispielsweise zehn raumbezogene Attribute zur Quartiersdefinition genutzt

werden [5]. Neben baulichen Charakteristika können auch demographische, Umwelt- oder politische Faktoren genutzt werden. In dieser Arbeit wird unter einem Quartier ein geografischer Bereich verstanden, welcher sich durch seine Bebauungs- und Einwohnerstruktur abgrenzen lässt. Wie [7-9] zeigen, gibt es bereits verschiedene und aufeinander aufbauende Ansätze zur Typisierung von Quartieren. Auch im Kontext der Energieforschung existieren energetische Stadtraumtypen [10]. Gleichzeitig besteht eine Diskrepanz zwischen der zur Typisierung erforderlichen und den tatsächlich verfügbaren Daten [6]. Insbesondere wenn das Forschungsziel die Bildung von bundesweit repräsentativen Typquartieren ist, können viele bereits entwickelte Methoden nicht angewendet werden. In [6] werden die für Deutschland flächendeckend verfügbaren Datenquellen des Gebäudebestandes aufgezeigt und werden zur Typisierung am Beispiel Berlin angewendet.

In dieser Arbeit werden ebenfalls deutschlandweit verfügbare Daten verwendet. Neu ist, dass vier heterogene Städte zur Bildung von Typquartieren herangezogen werden. Dadurch weisen die gebildeten Typquartiere eine höhere Repräsentativität auf und die abgeleiteten Kennwerte lassen sich auf andere Städte übertragen.

2 Methode

Ziel der vorgestellten Methode ist die automatisierte Ableitung strukturell homogener Typquartiere auf Basis deutschlandweit verfügbarer Geodaten. Der methodische Fokus liegt auf der Entwicklung einer übertragbaren, datengetriebenen Typisierung von Quartieren, die einen systematischen Vergleich sowie die Übertragung von Maßnahmen zwischen strukturell ähnlichen Gebieten ermöglicht. Zunächst wird die Datengrundlage und anschließend die verwendeten Schritte zur Datenverarbeitung erörtert.

2.1 Datengrundlage

Die Methode basiert auf der Auswertung von drei komplementären Datengrundlagen. Erstens werden die Siedlungsflächendaten zur Abgrenzung urban geprägter Räume herangezogen. Zweitens dienen gebäudespezifische georeferenzierte Daten zur Beschreibung der baulichen Morphologie und Gebäudefunktion. Drittens werden adressscharfe Haushalts- und Einwohnerdaten zur Abbildung der Bevölkerungsstruktur und des Gebäudetyps verwendet. Durch die Kombination dieser Datensätze wird eine Charakterisierung von Quartieren ermöglicht, die sowohl bauliche- als auch einwohnerbezogene Aspekte berücksichtigt.

2.1.1 Gebäudemorphologie

Die bauliche Struktur der Quartiere wird primär über das amtliche 3D-Gebäudemodell Deutschland in der Ausprägung Level-of-Detail-2 (LoD2) abgebildet. Der Datensatz umfasst bundesweit alle im Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem erfassten Gebäude und Bauwerke und stellt diese mit vereinfachten Dachformen dreidimensional dar. Die geometrische Lagegenauigkeit entspricht dabei der Genauigkeit der zugrunde liegenden Hausumringe des Liegenschaftskatasters.

Der LoD2-Datensatz liegt flächendeckend für die Bundesrepublik Deutschland vor. Er enthält neben den Gebäudegeometrien unter anderem Informationen zur Gebäudehöhe, Dachform und Gebäudefunktion. Für die vorliegende Methode dient der LoD2-Datensatz als primäre

Quelle zur Ableitung von Merkmalen, die Aussagen über Bebauungsdichte, Höhenstruktur, Gebäudefunktion und Grundfläche erlauben. Die Nutzung eines bundesweit konsistenten Gebäudemodells stellt sicher, dass strukturelle Unterschiede zwischen Städten nicht auf unterschiedliche Datenqualitäten oder Erfassungsmethoden zurückzuführen sind, sondern tatsächliche bauliche Unterschiede widerspiegeln [2].

2.1.2 Haushalts- und Einwohnerstruktur

Die bevölkerungs- und nutzungsbezogene Dimension der Quartiere wird über den Datensatz Haushalte Einwohner Bund (HH-EW-Bund) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie abgebildet. Der Datensatz enthält adressscharfe, deutschlandweit berechnete Angaben zur Anzahl der Haushalte und Einwohner pro Adresse sowie ergänzende Informationen zur Gebäudenutzung, Gebäudecharakteristik, Höhenkategorie und Baujahresklasse. Es handelt sich bei HH-EW-Bund um modellierte Daten, die aus unterschiedlichen Quellen abgeleitet und miteinander abgeglichen werden. Die Geokodierung der Adressen erfolgt auf Basis amtlicher Adressdaten unter Verwendung des BKG-Geokodierungsdienstes, wobei die Lagequalität jeder Adresse über definierte Güteklassen dokumentiert wird. Dadurch ist eine differenzierte Bewertung der räumlichen Genauigkeit möglich. Die adressscharfe Struktur des Datensatzes erlaubt eine Aggregation auf quartiersähnliche Analysegebiete. Für die vorliegende Analyse sind insbesondere die Attribute der Einwohner und Gebäudecharakteristik relevant, da sie eine funktionale Ergänzung zur rein baulichen Beschreibung liefern [3].

2.1.3 Siedlungsflächen

Zur räumlichen Abgrenzung urban geprägter Räume werden amtliche Siedlungsflächendaten verwendet, die bebaute und funktional genutzte Flächen eindeutig von nicht urbanen Bereichen trennen. Diese Datengrundlage dient dazu, die Analyse auf tatsächlich siedlungsrelevante Räume zu beschränken und großflächige Freiräume, Verkehrs- oder landwirtschaftliche Flächen von der Typisierung auszuschließen. Damit wird sichergestellt, dass die resultierenden Typquartiere ausschließlich urbane Strukturen repräsentieren [1].

Zunächst werden die Gebäude- und Einwohnerdaten (LoD2 und HH-EW) räumlich den abgegrenzten Siedlungsflächen zugeordnet. In einem zweiten Schritt werden alle innerhalb einer Siedlungsfläche liegenden Informationen nach festgelegten Kriterien aggregiert, um strukturprägende Merkmale auf Ebene der Siedlungsflächen zu bilden. Einbezogen werden Informationen zur Gebäudecharakteristik, zur Gebäudefunktion sowie gebäude- und flächenspezifische Angaben. Die so gebildeten Merkmale werden zu einem multidimensionalen Merkmalsvektor je Siedlungsfläche zusammengeführt, der die Grundlage für die nachfolgende Clusteranalyse bildet. Eine Übersicht der Merkmale ist in Tabelle 1 dargestellt. Ziel dieses Vorgehens ist die Bildung von quartiersähnlichen Einheiten, welche eine vergleichbare innere Struktur aufweisen, deren Größe jedoch variieren kann. Diese Einheiten stellen damit eine geeignete Grundlage für eine typologische Analyse dar.

Gebäudecharakteristik <i>Relativer Anteil</i>	Gebäudfunktion <i>Relativer Anteil</i>	Gebäudespezifisch <i>Mediane und Interquartilsabstand</i>	Flächenspezifisch
<ul style="list-style-type: none"> • Einfamilienhäuser • Reihenhäuser • Mehrfamilienhäuser • Wohnblöcke • Gewerbe- und Bürogebäude 	<ul style="list-style-type: none"> • Wohnen • Gemischtes Wohnen • Sonstiges – energetisch relevant • Garten • Energetisch irrelevant 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäudegrundfläche [m²] • Gebäudehöhe [m] • Etagenanzahl • Einwohnerdichte [1/Adresse] 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebäudedichte [1/ha] • Bebauungsdichte [m³/m²] • Einwohnerdichte [1/ha] • Unternehmensdichte [1/ha]
HH-EW	LoD2	HH-EW + LoD2	HH-EW + LoD2

Tabelle 1 Merkmale je Siedlungsfläche zur anschließenden Clusterung

2.2 Datenverarbeitung

Ein zentraler Bestandteil der Methode ist eine explizite Qualitätssicherung vor der Clusteranalyse. Siedlungsgebiete mit unvollständiger Datengrundlage, aufgrund fehlender baulicher oder bevölkerungsbezogener Informationen, werden von der Clusterung ausgeschlossen. Diese Einheiten werden nicht ignoriert, sondern als separate Kategorie „Sonstige“ ausgewiesen, um den Gültigkeitsbereich der Typisierung transparent darzustellen. Darüber hinaus werden Siedlungsgebiete identifiziert, die unterhalb einer definierten Mindestschwelle an adressscharfen Daten liegen. Diese Gebiete werden als „Einsiedler“ bezeichnet und zeichnen sich durch eine hohe strukturelle Instabilität aus, da ihre Merkmalsausprägungen stark von Einzelbeobachtungen geprägt sind. Eine Einbindung solcher Einheiten in ein auf Varianzminimierung basierendes Clustering würde die Stabilität der Clusterzentren beeinträchtigen. Aus diesem Grund werden „Einsiedler“ bewusst nicht in die Clusterbildung einbezogen, sondern separat ausgewiesen.

Die Typisierung der Quartiere erfolgt mittels einer unüberwachten Clusteranalyse auf Basis des k-Means-Verfahrens. Der Einsatz eines unüberwachten Ansatzes ist methodisch begründet, da keine a-priori-Annahmen über die inhaltliche Ausprägung urbaner Strukturtypen getroffen werden. Die Typquartiere werden stattdessen datengetrieben aus den Ähnlichkeiten im mehrdimensionalen Merkmalsraum abgeleitet. Die Anzahl der Cluster mit $k = 6$ basiert auf einer Kombination aus quantitativer Validierung und inhaltlicher Plausibilisierung. Zur quantitativen Bewertung unterschiedlicher Clusterzahlen wurde eine Silhouettenanalyse und Elbow-Diagnostik durchgeführt, bei der die resultierende Clusterstruktur hinsichtlich innerer Homogenität und äußerer Trennschärfe analysiert wurde. Ergänzend zur quantitativen Validierung ist die Anzahl an Cluster auch inhaltlich begründet und orientiert sich an einer bereits etablierten Typisierung der Stadt Berlin [6].

In der vorliegenden Analyse werden die Städte Ulm, Neu-Ulm, Münster und Herne gemeinsam betrachtet. Die Auswahl strukturell heterogener Städte stellt sicher, dass ein breites Spektrum urbaner Strukturen in die Clusterbildung einfließt und die resultierenden Typquartiere nicht auf städtespezifische Besonderheiten beschränkt sind.

3 Ergebnisse

Die Clusteranalyse auf Basis von 5.561 Siedlungsflächen zeigt eine klare Differenzierung urbaner Strukturen entlang baulicher und sozioökonomischer Merkmale. Tabelle 2 verdeutlicht, dass Einfamilienhaus- (EFH; n=1.864), Reihenhau- (RH; n=1.553) und Mehrfamilienhausquartiere (MFH; n=1.219) den überwiegenden Anteil der Siedlungsflächen ausmachen und damit die dominierenden Siedlungsformen in den vier analysierten Städten repräsentieren. Demgegenüber treten die Typen Wohnblock (n=316) und Innenstadt (n=158) deutlich seltener auf, was auf deren räumliche Konzentration in dichter bebauten urbanen Kernlagen hinweist, während der Typ Industrie (n=451) einen eigenständigen funktionalen Typ mit spezifischen baulichen und nutzungsbezogenen Charakteristika bildet.

	Cluster	EFH	RH	MFH	Wohnblock	Innenstadt	Industrie	Einsiedler
	Anzahl identifizierter Cluster	1864	1553	1219	316	158	451	2280
Gebäudecharakteristik bezogen auf die Siedlungsfläche (HH-EW-Daten)	Anteil EFH [%]	71	15	12	6	9	35	68
	Anteil RH [%]	16	73	13	7	8	11	8
	Anteil MFH [%]	12	10	66	22	54	14	14
	Anteil Wohnblock [%]	1	2	8	64	19	5	2
	Anteil Gewerbe/Büro [%]	1	0	1	1	11	35	9
Gebäudefunktion bezogen auf die Siedlungsfläche (LoD2-Daten)	Anteil Wohnen [%]	37	50	53	60	18	7	21
	Anteil gemischtes Wohnen [%]	1	0	4	4	47	2	2
	Anteil Sonstiges – energetisch relevant [%]	17	4	9	9	19	61	36
	Anteil Garten [%]	28	34	25	14	7	8	14
	Anteil energetisch irrelevant [%]	17	11	9	13	10	22	28
Gebäude- spezifische Angaben (HH-EW + LoD2-Daten)	Gebäudegrundfläche [m ²]	136,1	90,3	169,9	288,8	224,6	668	416,3
	Gebäudehöhe [m]	8,8	9,2	13,5	14,3	16,3	11,1	9
	Etagenanzahl	2,7	2,9	4,2	4,7	4,6	3,1	2,8
	Einwohnerdichte [Einwohner/Adresse]	2,7	2,4	7,5	13,6	5,7	2	4
Flächenspezifische Angaben (HH-EW + LoD2-Daten)	Gebäudedichte [Gebäude/ha]	12	19	15	11	23	3	5
	Bebauungsdichte [m ³ /m ²]	1,3	1,7	3,3	3,7	7,6	3	1,3
	Einwohnerdichte [Einwohner/ha]	32	62	120	152	138	8	13
	Unternehmensdichte [Unternehmen/ha]	1	1	4	4	33	3	1

Tabelle 2 Mittlere Kennwerte von Typquartieren auf Basis von vier geclusterten deutschen Städten

Die Kategorie „Sonstige“ wird hier nicht ausgewiesen, da sie ausschließlich Siedlungsflächen mit unzureichender Datengrundlage umfasst und im vorliegenden Datensatz keine relevante Fallzahl aufweist. Hinsichtlich der Gebäudecharakteristik weisen die EFH-Quartiere mit einem mittleren EFH-Anteil von 71 % eine stark monofunktionale Prägung auf, ergänzt durch moderate Anteile an Reihenhäusern (16 %) und Mehrfamilienhäusern (12 %). Reihenhäuserquartiere sind demgegenüber deutlich homogener strukturiert (73 % RH-Anteil) und zeichnen sich durch kleinere mittlere Gebäudegrundflächen (90,3 m²) sowie eine vergleichsweise hohe Gebäudedichte (19 Gebäude/ha) aus. Mehrfamilienhausquartiere zeigen mit 66 % MFH-Anteil eine klar verdichtete Wohnstruktur, die sich in höheren mittleren Gebäudehöhen (13,5 m), Etagenanzahlen (4,2) sowie einer deutlich erhöhten Einwohnerdichte pro Adresse (7,5) widerspiegelt. Wohnblockquartiere stellen den am stärksten verdichteten reinen Wohntyp dar, mit einem dominierenden Wohnblockanteil von 64 %, hohen mittleren Gebäudehöhen (14,3 m), einer Einwohnerdichte von 152 Einwohnern/ha sowie einer Bebauungsdichte von 3,7 m³/m². Die Bebauungsdichte ergibt sich aus dem berechneten Gebäudevolumen der LoD2-Daten und bezieht sich auf die jeweilige Siedlungsfläche. Innenstadtquartiere unterscheiden sich hiervon strukturell durch eine ausgeprägte funktionale Durchmischung (47 % gemischtes Wohnen), die höchste Bebauungsdichte im gesamten Datensatz (7,6 m³/m²) sowie eine sehr hohe Unternehmensdichte (33 Unternehmen/ha), was ihre Rolle als wirtschaftliche und infrastrukturelle Zentren unterstreicht. Industriequartiere heben sich klar von den übrigen Typen ab: Sie weisen mit 668 m² die mit Abstand größte mittlere Gebäudegrundfläche, einen sehr hohen Anteil „sonstiger – energetisch relevanter“ Nutzungen (61 %), eine geringe Wohnnutzung (7 %) sowie die niedrigste Einwohnerdichte (8 Einwohner/ha) auf. Gleichzeitig ist die Gebäudedichte mit 3 Gebäuden pro ha Siedlungsfläche vergleichsweise gering, was auf großflächige Einzelbauwerke und intensive Nutzungsstrukturen schließen lässt. Die Kategorie „Einsiedler“ zeigen heterogene Merkmalsausprägungen, die keine stabile Zuordnung zu den sechs Hauptclustern erlauben. Einsiedler weisen hohe EFH-Anteile (68 %), geringe Bebauungsdichten (1,3 m³/m²) und niedrige Einwohnerdichten (13 Einwohner/ha) auf.

Die kartographische Darstellung am Beispiel der Stadt Herne (Abbildung 1) illustriert die räumliche Verteilung der Typquartiere und zeigt eine räumliche Musterbildung. Verdichtete Typen (Innenstadt, Wohnblock, MFH) konzentrieren sich auf zentrale Lagen, während EFH- und RH-Quartiere überwiegend in periphereren Bereichen auftreten. Industriequartiere sind räumlich klar abgegrenzt und folgen überwiegend bestehenden Gewerbe- und Infrastrukturachsen. Diese räumliche Struktur bestätigt die Kennwerte der Typquartier aus Tabelle 2 und unterstreicht die Validität der Clusterlösung. Darüber hinaus ermöglicht die Karte eine visuelle Identifikation von Übergangsbereichen zwischen unterschiedlichen Typquartieren. Diese Grenzräume sind für infrastrukturelle Fragestellungen besonders relevant, da sie häufig Mischformen von Bebauungs- und Nutzungsstrukturen aufweisen und somit potenziell hybride Transformationsstrategien erfordern. Die Abbildung macht solche räumlichen Übergänge transparent und unterstützt damit eine differenzierte planerische Interpretation jenseits rein tabellarischer Kennwerte. Ein weiterer Vorteil der kartographischen Darstellung besteht in ihrer Eignung als Kommunikationsinstrument für praxisnahe Anwendungen. Während die numerischen Clusterkennwerte primär für wissenschaftliche Analysen relevant sind, bietet die visuelle Repräsentation eine intuitiv verständliche Grundlage für den Dialog mit kommunalen Akteuren, Stadtplanern und Energieversorgern. Die räumliche

Verortung der Typquartiere erleichtert die Übertragung der Ergebnisse in konkrete Planungsprozesse.

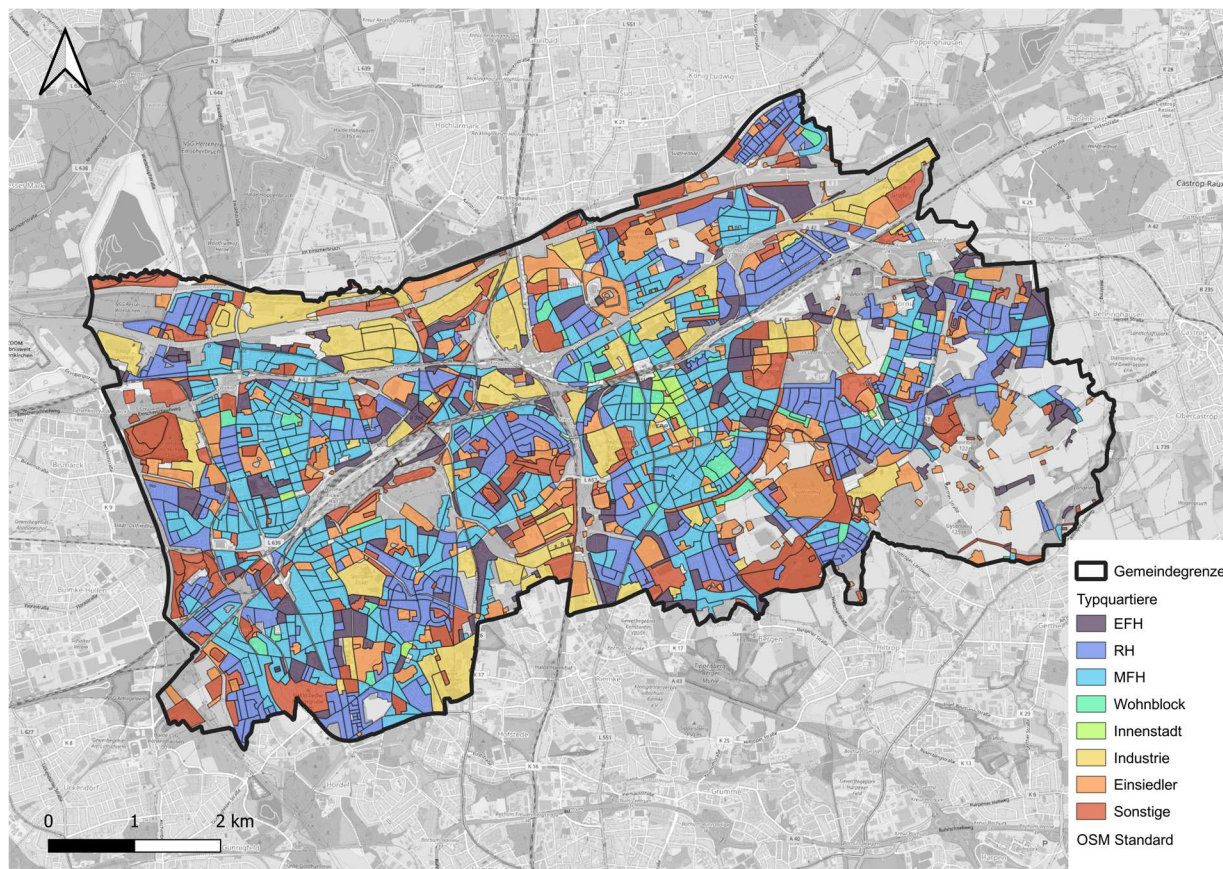


Abbildung 1 Gebildete Typquartiere am Beispiel der Stadt Herne (Deutschland)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass eine automatisierte, datengetriebene Clusterung von Siedlungsflächen auf Basis bundesweit verfügbarer Geodaten geeignet ist, strukturell homogene Typquartiere abzuleiten. Durch die Kombination von LoD2-Gebäudemodellen, adressscharfen HH-EW-Daten und amtlichen Siedlungsflächen konnte eine konsistente Merkmalsbasis geschaffen werden, die sowohl bauliche als auch bevölkerungsbezogene Charakteristika integriert. Die k-Means-Clusterung mit sechs Quartierstypen führt zu einer plausiblen Differenzierung urbaner Strukturen, die sich sowohl in den numerischen Kennwerten als auch in der räumlichen Verteilung am Beispiel der Stadt Herne widerspiegelt. Die Methode ist auf heterogene Städte anwendbar und stellt eine belastbare Grundlage für vergleichende Analysen sowie strategische Transformationsplanungen im Energiesektor bereit.

Aufbauend darauf würde eine Ausweitung der Datengrundlage auf das gesamte Bundesgebiet die statistische Repräsentativität der gebildeten Typquartiere erhöhen und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Städte und Regionen weiter stärken. Gleichzeitig wäre es methodisch sinnvoll, zusätzliche Merkmale in den Clusterprozess zu integrieren, da dies eine feinere Differenzierung der Quartierstypen ermöglichen und gegebenenfalls zu einer höheren optimalen Clusteranzahl führen könnte. Insbesondere das geschätzte Gebäudealter sowie die

Dachform stellen bundesweit verfügbare Attribute dar, die die energetische Charakterisierung der Quartiere verfeinern würden. Informationen zum Sanierungszustand und zum aktuellen Wärmeenergieträger liegen derzeit nicht flächendeckend vor und müssten entweder modelliert oder durch zusätzliche Erhebungen gewonnen werden. In Fällen unvollständiger Datengrundlage könnten hochauflösende Luftbilder in Kombination mit den vorhandenen LoD2- und HH-EW-Daten als Trainingsdatensatz genutzt werden, um das Analysegebiet systematisch zu erweitern. Eine Übertragung des methodischen Ansatzes auf europäische oder internationale Kontexte erscheint grundsätzlich möglich, insbesondere vor dem Hintergrund zunehmend verfügbarer globaler Gebäudedatensätze [11]. Zukünftige Arbeiten sollten außerdem die energetische Interpretation der Typquartiere vertiefen, sodass quartierspezifische Transformationsstrategien aufgezeigt werden können.

5 Danksagung



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Projekts AtEne (FKZ: 03EN3094A) gefördert. Für den Inhalt dieser Veröffentlichung sind ausschließlich die Autorinnen und Autoren verantwortlich.

6 Referenzen

- [1] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG): Digitales Basis-Landschaftsmodell – Siedlungsflächen Deutschland, Frankfurt am Main, 2024, <https://www.bkg.bund.de> [Daten auf Anfrage erhalten].
- [2] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG): 3D-Gebäudemodelle LoD2-DE (Level of Detail 2), Frankfurt am Main, 2024, <https://www.bkg.bund.de> [Daten auf Anfrage erhalten].
- [3] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG): Haushalte und Einwohner Deutschland (HH-EW-Bund), Frankfurt am Main, 2024, <https://www.bkg.bund.de> [Daten auf Anfrage erhalten]
- [4] Deutscher Bundestag (19. Wahlperiode), Sachverständigenrat für Umweltfragen: „Umweltgutachten 2020. Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa“, ISBN 978-3-947370-16-0, Berlin, 2020
- [5] Schnur, O.: „Quartiersforschung revisited. Konzepte und Perspektiven eines Forschungsfelds“, Deffner, V. und U. Meisel (Hrsg.): StadtQuartiere - sozialwissenschaftliche, ökonomische und städtebaulich-architektonische Perspektiven, Dortmund, 2013
- [6] Müller, A.: „Methodik zur datenbasierten Typisierung von Quartieren anhand baulicher Strukturen – Geometrisch-topologische Grundlagen für die energetische Bewertung des nationalen Quartiersbestandes auf Basis von Geoinformationsdaten“, DOI: 10.26083/tuprints-00026417, Darmstadt, 2023

- [7] Roth, U.: „Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen“, Schriftenreihe des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau: 6, Raumordnung, Band 65, 1980
- [8] Blesl, M.: „Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs“, Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart, <http://dx.doi.org/10.18419/opus-1569>, Stuttgart, 2002
- [9] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: „Energetische Quartiersplanung in Deutschland: wissenschaftliche Begleitung der Förderaktivität "Energieeffiziente Stadt" - Schlussbericht Phase 1; EnEff: Stadt - Forschung für die energieeffiziente Stadt“, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2010, DOI:10.2314/GBV:643917160
- [10] Dettmar, J. et al.: Fraunhofer IRB Verlag: „Energetische Stadtraumtypen. Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen“, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart, <https://doi.org/10.51202/9783738803433>, 2020
- [11] Zhu et al.: Technische Universität München (TUM): „GlobalBuildingAtlas: An Open Global and Complete Dataset of Building Polygons, Heights and LoD1 3D Models“, München, DOI: 10.48550/arXiv.2506.04106, 2025