

# Automatische Abgrenzung und multikriterielle Bewertung energetischer Quartierszellen für die Transformation lokaler Wärmeenergiesysteme

Philip GROESDONK <sup>1\*</sup>, Luis BLANCO <sup>1</sup>, Sankalp AGRAWAL <sup>1</sup>, René WINKELS <sup>1,2</sup>, Jana STENGLER <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Solarforschung, Im Langenbroich 13, 52428 Jülich

<sup>2</sup> Fachhochschule Aachen, Campus Jülich, Heinrich-Mußmann Straße 1, 52428 Jülich

\* philip.groesdonk@dlr.de

---

## Kurzfassung

Ein zellulärer Aufbau des zukünftigen Energiesystems kann ein Weg sein, vielfältige und veränderliche Versorgungsanforderungen effizient zu erfüllen. Dessen Zellen lassen sich bereits früh, z. B. bei der kommunalen Wärmeplanung (KWP), definieren. Dieser Beitrag beschäftigt sich am Beispiel der Stadt Jülich mit einer innovativen Methode zur räumlichen Abgrenzung energetischer Quartierszellen für den Neubau von Wärmenetzen. Auf Basis von deutschlandweit verfügbaren Geodaten wird ein Ansatz zur Definition von Minimaleinheiten als Urban Energy Units (UEUs) statt der in der KWP üblichen Baublöcke präsentiert. Für das Zusammenfügen von UEUs zu Zellen werden Clustering-Algorithmen auf Basis von Straßengeometrie-Verknüpfungen als am vielversprechendsten identifiziert. Die Wärmenetzeignungsanalyse auf Ebene der UEUs profitiert von adressscharfen Gasverbräuchen, was bei KWP-Bestandsanalysen berücksichtigt werden sollte.

## Schlagworte

Abwärme; Energiegemeinschaften; Fernwärme; Nahwärme; Kommunale Wärmeplanung; Wärmenetze

---

## 1. Einleitung

Für die Wärmewende werden in den nächsten Jahren lokale Energieinfrastrukturen umfangreich transformiert und neu gebaut. Das umfasst Strom-, Gas- und insbesondere Wärmenetze. Vielerorts werden während der kommunalen Wärmeplanung (KWP) Gebiete für verschiedene erneuerbare Wärmeversorgungs-lösungen definiert.

Die Planung und Auslegung dieser Energieinfrastrukturen bewegen sich in einem Spannungsfeld räumlich unterschiedlicher Anforderungen an die Versorgung, begrenzter Potenziale für erneuerbare Energien und limitierter finanzieller Ressourcen für Investitionen. Ein zukünftiges Energiesystem muss so konzipiert werden, dass es den aktuell schon diversen und sich zukünftig verändernden Randbedingungen z. B. an Vorlauftemperaturen und Verfügbarkeit von Wärmequellen gerecht werden kann. Daher gilt es bereits in einem frühen Stadium, etwa während der KWP oder direkt daran anschließend, Gebiete für den Netzbau bzw. die -transformation zu definieren. Hier bietet sich eine lokale Gliederung in zelluläre Systeme oder energetische Quartiere an, da

- die Gebiete untereinander priorisiert,
- Investition und Risiko einzelner Projekte sowie Aufwand späterer Anpassungen reduziert und
- die Versorgung gezielt auf die Anforderungen dort vorhandener Abnehmer angepasst werden können.

Eine Herausforderung besteht jedoch darin, potenzielle Zellen im Gebäudebestand optimal zu definieren: Dieser Konferenzbeitrag beschäftigt sich am Beispiel des Stadtgebiets Jülich mit der Bildung und räumlichen Abgrenzung energetischer Quartierszellen. Ziel ist die Nutzbar-machung einer vordefinierten Wärmequelle, hier der Abwärme eines Rechenzentrums. Beleuchtet werden auch die Auswirkungen der genutzten Daten auf die Ergebnisse der räumlichen Gliederung, insbesondere einer fein aufgelösten Wärmenetzeignungsanalyse.

Eine Beschreibung des Gebiets und der Vorgehensweise für die Quartiersbildung erfolgt in drei Schritten. Schlussfolgerungen aus der Fallstudie der Stadt Jülich und die Relevanz von Datenquellen sowie Berechnungs- und Clustering-Methoden für die lokale Wärmewende werden in der Diskussion herausgearbeitet.

### Stand der Technik zur Gebietsdefinition/Clustering

Für die Transformation der Wärmeversorgung spielt aufgrund hoher Leitungsbau- und Betriebskosten die räumliche Nähe günstiger Energiequellen eine zentrale Rolle. Historisch galt dies für die Nutzung von Abwärme aus Stromerzeugung oder Industrieproduktion, heute für erneuerbare Quellen wie Biomasse. Auch Ankerkunden können die Erschließung anliegender Gebiete befördern.

Um in einer strategischen Herangehensweise kleinräumige Anforderungen zu berücksichtigen, kann Clustering helfen. Zudem ermöglicht die vorherige Abgrenzung

konkreter Versorgungsgebiete eine Effizienzsteigerung in der Optimierung von Energie- und Wärmesystemen, da sie die Modellkomplexität reduziert, jedoch wesentliche räumliche und nachfrageseitige Muster bewahrt.

Die KWP definiert in Deutschland Gebiete und Eignung für Wärmeversorgungssysteme auf Blockebene konform zum Wärmeplanungsgesetz (WPG), ermittelt die Eignung für Fernwärme aber auch über die Wärmelinien. Da die Wärmelinien (Straßen) gerade die Grenzen von Blöcken sind, **harmonisieren die Ansätze kleinräumig nicht**.

Auch Blanco et al. [1] stellen einen Mittelweg zwischen einer detaillierten gebäudeorientierten Perspektive und der zu groben Gesamtbetrachtung eines Stadtteils vor, indem das urbane Gefüge einer Stadt in sogenannte Urban Energy Units (UEUs) unterteilt und diese energetischen Siedlungstypen (16 Klassen, orientiert an Dettmar et al. [2]) zugeordnet werden. Quartiere werden mithilfe von Voronoi-Clustering mit Zentren an Niederspannungs-Transformatoren abgegrenzt. Auch hier zeigt sich in den Ergebnissen eher eine Blockstruktur.

Graphenbasierte Clustering-Methoden als weitere Möglichkeit modellieren Daten als Netzwerk aus Knoten (Datenpunkten) und Kanten (Beziehungen) und lassen Cluster durch Optimierungskriterien wie im Baukastenprinzip automatisch entstehen, ohne dass die Clusteranzahl vorab festgelegt werden muss. Sie sind flexibel, können komplexe Strukturen erfassen und benötigen wenig Benutzereingriff. In der Energiesystemanalyse wenden z. B. Simonsson et al. [3] solche Methoden an.

In allen Fällen notwendig ist eine Datengrundlage über den Gebäudebestand und ggf. eine Vorabklassifizierung in Minimaleinheiten (Blöcke, UEUs, Knoten).

Trotz vieler Forschungsarbeiten und methodischen Innovationen in der Energie- und Wärmesystemoptimierung besteht noch eine Diskrepanz zur Anwendung in realen Transformationsprojekten, insbesondere bezüglich gesetz- und fördermittelkonformer Prozesse.

## 2. Material und Methoden

Die hier vorgestellte Methodik umfasst drei Schritte:

- Klassifizierung der Stadt in Gebietstypen, Ermittlung von Minimaleinheiten („Urban Energy Units“, UEUs),
- Berechnung energetisch relevanter Parameter dieser Einheiten (z. B. Wärmenachfrage, Temperaturniveau)
- Zusammenfügen von Minimaleinheiten zu energetischen Quartierszellen

Alle Schritte, die im Folgenden vorgestellt werden, basieren auf Geodaten über das Untersuchungsgebiet. Die Zusammenstellung dieser Geodaten wird hier kurz beschrieben, für weitere Erklärungen jedoch auf die Dokumentation der jeweiligen Datenquellen verwiesen.

### Zusammenstellung grundlegender Geodaten

Voraussetzung für die Beschreibung und Gliederung des Gebäudebestands ist die Zusammenstellung einer möglichst ausführlichen Datenbasis. Diese wird für Jülich mit der auf der BauSIM 2024 vorgestellten Methodik [4] aus LoD2-3D-Gebäudemodellen, Zensus-Baujahrdaten, der IWU-Gebäudetypologie für Wohn- [5] und Nichtwohngebäude [6], Daten aus der OpenStreetMap (OSM), Wetter-Testreferenzjahren sowie historischen Wetterdaten erstellt. Ergänzend werden den Gebäude(-teilen) höherrangige geographische Elemente zugewiesen, nämlich Adresspunkte, Flurstücke, Straßen und Baublöcke aus

offenen Landesgeodaten. Nicht immer ist eine eindeutige Zuweisung über Lagebeziehungen möglich. Die Zuordnung zu den Adressen erfolgt zusätzlich über die Lage auf den Flurstücken, die der Adressen zu den Straßen über Straßennamen und Nähe.

Auf diese Weise entstehen für alle Gebäude im Stadtgebiet einzeln berechenbare Modelle, deren Parameter in Verbrauchspunkten an den jeweiligen Adresskoordinaten gesammelt werden um die geoinformatische Verarbeitung zu vereinfachen. Die Siedlungstypen können wie bei Blanco et al. [1] klassifiziert werden.

Die Vorgehensweise lässt sich im Wesentlichen wie hier für Nordrhein-Westfalen (NRW) vorgestellt auf alle Bundesländer übertragen, auch wenn manche Basisdaten nicht öffentlich sind oder aufbereitet werden müssten.

### Definition von Minimaleinheiten/Urban Energy Units

Das Konzept der UEUs verfolgt das Ziel, für die Optimierung von Energiesystemen nicht jedes Gebäude einzeln zu betrachten, sondern zusammengehörige Gruppen zu identifizieren, für die sich aufgrund geographischer Lage und gleicher Anforderungen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine gemeinsame (oder gleichermaßen dezentrale) Versorgung am besten eignet. Dies reduziert einerseits die Rechenlast beispielsweise für Optimierungsmodelle, kann aber auch für Datenschutzbelange relevant sein. Ähnlich des bei Dettmar et al. [2] gewählten Ansatzes zum Zusammenfügen von Sektionen zu Quartieren sollen hier UEUs beim Clustering bzw. einer Energiesystemoptimierung zu Zellen zusammengesetzt werden, die physisch und/oder organisatorisch die Minimaleinheit im Zielenergiesystem bilden.

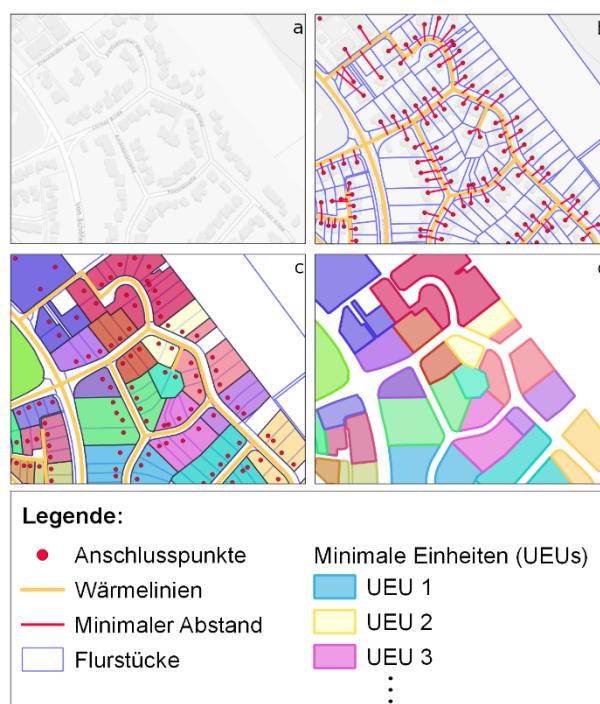


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung anhand einer Einfamilienhaussiedlung in Jülich: Zuordnung von Anschlusspunkten zu Straßen (b), UEU-Gruppierung nach Straßenabschnitten (c) und Einfärbung der Flurstücke (d).

In diesem Beitrag wird vorgeschlagen, als UEU eine Gruppe von Verbrauchspunkten zu definieren, die demselben Straßenabschnitt und dem gleichen energetischen Quartierstyp zugeordnet sind. Abb. 1 enthält eine beispielhafte Darstellung eines Ausschnitts von

Jülich mit einer Zuordnung von Gebäuden zu Verbrauchspunkten und Straßenabschnitten. Hier umfasst eine farbliche UEU-Markierung alle Verbrauchspunkte und deren Flurstücke. An allen Straßenabschnitten kommt jeweils nur eine Nutzung vor. Nicht anwendbar ist die Vorgehensweise dort, wo unterschiedliche Quartierstypen im Wohngebäudebereich (z. B. lose Einfamilienhaus- (EFH-) und Mehrfamilienhaus-(MFH-)Bebauung, die in der Regel durch Wohnfläche pro Gebietsgröße eingeteilt wird) am selben Straßenabschnitt auftreten. Die automatische Typisierung auf Flurstücksebene ist zu ungenau, weil Flurstücke zu heterogen sind. Wurden jedoch bereits Gebäudegruppen gebildet, ist es methodisch herausfordernd, diese wieder aufzutrennen. Ersatzweise erfolgt eine gemeinsame Typisierung aller Wohngebäude an einem Straßenabschnitt. Gegenüber den in der KWP üblichen Blöcken haben die UEUs den Vorteil, dass sie von vornherein die für die spätere Infrastruktur relevanten Straßen als Grundlage nutzen.

### Berechnung energetisch relevanter Parameter

Für die weitere Verarbeitung sind mehrere Parameter auf Ebene der UEUs erforderlich. Tab. 1 zeigt eine Liste dieser Parameter und ihrer Bedeutung.

Tab. 1: UEU-Parameter und Bedeutung.

Parameter	Formelzeichen	Bedeutung
Wärmebedarf (unsaniert, saniert, aktuell)	$Q_{h,std}$ $Q_{h,ret}$ $Q_{h,act}$	Nutzwärmebedarf Raumwärme und Warmwasser
Sanierungstiefe	$f_{ret}$	Mittl. Sanierungstiefe der Wohngebäude
Benötigtes Temperaturniveau	$T_{VL,std}$ $T_{VL,ret}$ $T_{VL,act}$	Benötigte Vorlauftemperatur für Raumwärme (Wohngebäude)
Lastprofil(typ)	-	Zeitliche Auflösung des Wärmebedarfs

Die Wärmebedarfe werden unter Nutzung der Gebäudehülleneigenschaften typischer sanierter bzw. unsanierter Gebäude [5] und der LOD2-3D-Geometrie angelehnt an DIN V 18599 berechnet (siehe [4]). Die aktuelle Sanierungstiefe  $f_{ret}$  lässt sich unter Nutzung des gemessenen Endenergieverbrauchs  $Q_{use}$  (zum Beispiel für Gas) aus einem Vergleich mit dem Bedarf im sanierten  $Q_{h,ret}$  und unsanierten Fall  $Q_{h,std}$ , jeweils berechnet unter Verwendung historischer Wetterdaten, abschätzen:

$$f_{ret} = \begin{cases} 0, & Q_{use} \cdot \eta_{bld} \geq Q_{h,std} \\ 1, & Q_{use} \cdot \eta_{bld} \leq Q_{h,ret} \\ \frac{Q_{h,std} - Q_{use} \cdot \eta_{bld}}{Q_{h,std} - Q_{h,ret}}, & \text{sonst} \end{cases}, \quad Gl. 1$$

Zu beachten ist:

- Endenergie und Nutzwärme sind nicht direkt vergleichbar. Die Effizienz der Heizung bei der Umwandlung von Endenergie in Erzeugernutzwärme sowie die Verteilverluste im Gebäude werden hier als Gesamteffizienz im Gebäude  $\eta_{bld}$  zusammengefasst.
- Die Gebäudeteile, auf die sich Bedarf und Verbrauch beziehen, müssen deckungsgleich sein. Das erfordert

in Einzelfällen eine Nachbearbeitung der Zuordnung.

- Alle bei der Transformation der Versorgung zu ersetzenden Endenergieträger müssen berücksichtigt werden. Während vorhandene Umwelt- oder Solarwärmenutzung die ermittelte Sanierungstiefe erhöhen und korrekterweise den zu versorgenden Bedarf verringern, können Verbräuche z. B. von Heizöl, Flüssiggas und ggf. Biomasse über zusätzliche Datenquellen wie Kehrbuschdaten abgeschätzt werden, um eine vollständige Datenbasis zu erhalten.

Falls eine Ermittlung der Sanierungstiefe nicht gebäudescharf möglich ist, kann Gl. 1 auch auf Gebäudegruppen angewendet werden. In Jülich ermöglichen die von den Stadtwerken eingebrachten Verbrauchsdaten aus dem Gasnetz einen Vergleich auf Adressebene und so eine Berechnung von aktuellen Sanierungstiefen. Üblich sind in der KWP aufgrund von Datenschutzvorgaben jedoch aggregierte Verbrauchswerte. Da keine Kehrbuschdaten als Datengrundlage für eine alters- oder typabhängige Heizungseffizienz vorliegen, wird pauschal  $\eta_{bld} = 0,95 \cdot 0,9 = 0,855$  angenommen.

Auch wenn individuelle Einflüsse wie Nutzungsunterschiede und Leerstand bei dieser Vorgehensweise vernachlässigt werden, entsteht eine detaillierte Beschreibung der lokalen Nachfrage, die auch als Grundlage für Prognosen des zukünftigen Wärmebedarfs im Jahr  $y$  dienen kann, wofür eine Prognose der zukünftigen Sanierungstiefe  $f_{ret,y}$  benötigt wird:

$$Q_{h,act,y} = Q_{h,std} - f_{ret,y} \cdot (Q_{h,std} - Q_{h,ret}) \quad Gl. 2$$

Das benötigte Temperaturniveau lässt sich abschätzen, wenn die jeweiligen Wärmebedarfe ins Verhältnis zur beheizten Fläche gesetzt werden. Der Lastprofiltyp kann durch Einzelsimulation der Gebäude oder über Standardlastprofile, was jeweils eine Zuordnung von Nutzungsdaten benötigt, ermittelt werden.

### Zusammensetzen von UEUs zu Quartierszellen

Für die Zusammensetzung von Zellen oder energetischen Quartieren aus mehreren UEUs können verschiedene Bewertungskriterien herangezogen werden. Hier ergibt sich die Fragestellung: Welche Kombination aus Gruppierungsmethodik und Bewertungskriterien sind am besten dazu geeignet, Cluster aus UEUs zu bilden und zu charakterisieren? Ziel der Gruppierung ist nicht die endgültige Entscheidung über den Anschluss einer Zelle an das Wärmenetz, sondern die Aufbereitung der Daten über die abgegrenzten Gebiete in einer Weise, dass sie für eine nachfolgende Optimierung des Gesamtsystems verwendbar sind. Für die weitere Beurteilung werden folgende Methoden in Betracht gezogen:

- Voronoi-Diagramme via Nähe zu Transformatoren,
- Clustering-Algorithmen, Kantengenerierung via Nähe,
- Clustering-Algorithmen, Kanten aus Straßendaten.

Kriterien für die Beurteilung sind:

- Vorteilhaftigkeit des Zusammenschließens gerade dieser UEUs, z. B. für die Erschließungspraxis,
- Schnittstellen für lokale Energiesystemoptimierung,
- Deutschlandweite Verfügbarkeit notwendiger Daten.

### 3. Ergebnisse

Die oben beschriebene Methodik wurde beispielhaft am Stadtgebiet Jülich durchgeführt, einschließlich der Bewertung von Möglichkeiten zum Clustering. Im Folgenden

werden zunächst Ergebnisse aus der Datenzusammenstellung und UEU-Bildung vorgestellt. Als Vergleichswert stehen die KWP-Basisdaten des Landes NRW [7], mit u. a. Wärmebedarfswerten für einzelne Gebäude sowie Blockdefinitionen zur Verfügung. Eine auf Blockebene ermittelte Sanierungsquote ist dort bereits in den Bedarfswerten der einzelnen Gebäude berücksichtigt.

### Wärmebedarf

Aus der Zuordnung der adressbezogenen Gasverbräuche des Jahres 2023 zu den Bedarfen lassen sich ausgehend von einem kumulierten Gesamtverbrauch von 227 GWh Erdgas (Endenergie) als Nutzwärmeverbräuche der Sektoren für Wohnnutzung 153,7 GWh, für öffentliche Gebäude 33,1 GWh, für Industrie 15,0 GWh und für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 7,4 GWh ermitteln. Die Differenz in der Summe entsteht durch  $\eta_{bld}$ , Blockheizkraftwerke, nicht lokalisierbare Verbräuche und Verbräuche außerhalb des Betrachtungsgebiets – insbesondere im Forschungszentrum Jülich, das separat untersucht wird. Die Wohngebäude erreichen nach der Definition aus Gl. 1 eine mittlere Sanierungstiefe von  $f_{ret} = 0,47$ . Dieser Wert erscheint angesichts des visuellen Sanierungszustandes in Jülich unrealistisch hoch, was darauf zurückzuführen ist, dass  $Q_{h,std}$  in Gl. 1 nicht die u. a. von Loga et al. [5, S. 80] dokumentierten tatsächlichen Verbräuche berücksichtigt, die in schlecht sanierten Gebäuden durch angepasstes Nutzungsverhalten üblicherweise deutlich unter berechneten Bedarfswerten liegen. Wird die ermittelte Sanierungstiefe auch auf nicht gasversorgte Gebäude übertragen, ergibt sich für das gesamte Stadtgebiet ein Nutzwärmebedarf für Wohngebäude (bezogen auf das Testreferenzjahr 2015) in Höhe von 278,5 GWh. Die KWP-Daten des Landes NRW [7] weisen für dieselbe Größe 251,0 GWh aus.

Für Nichtwohngebäude wird statt Bedarfswerten der Verbrauch genutzt, da erstere aufgrund der Nutzungsheterogenität und der Nichtverfügbarkeit von Baujahrsdaten erfahrungsgemäß ungenauer sind als bei Wohngebäuden.

### Indikatoren für die Wärmeplanung auf UEU-Ebene

Abb. 2 zeigt die UEU's im Stadtgebiet von Jülich (erstellt wie in Abb. 1 gezeigt). Diese lassen sich aufgrund ihres Bezugs zu einem Straßenabschnitt auch bzgl. ihrer Wärmenetzsignung nach KWP-Leitfaden [8] bewerten (s. 2). Diese Klassen dienen hier lediglich als Beispiel – eine pauschale Empfehlung für oder gegen ein Wärmenetz kann allein aufgrund der Wärmelinien-dichte nur bei sehr niedrigen Werten getroffen werden, da u. a. auch die Kosten potenzieller Wärmequellen – hier Abwärme aus einem Rechenzentrum – zu berücksichtigen sind.

Tab. 2: Wärmenetzsignung je nach Wärmelinien-dichte gemäß KWP-Leitfaden [8, S. 54].

Wärmelinien-dichte in $MWh\ m^{-1}\ a^{-1}$	Empfehlung zur Errichtung von Wärmenetzen
< 0,7	Kl. 1: Kein technisches Potenzial
0,7–1,5	Kl. 2: Bei Neuerschließung
1,5–2,0	Kl. 3: In bereits bebauten Gebieten
> 2,0	Kl. 4: Bei Hürden (z. B. Infrastrukturquerungen) für die Verlegung

Um die Eignung der Vorgehensweise für die Wärmeplanung zu beurteilen, d. h. inwiefern diese durch die Kombination von Bedarfs- und Verbrauchsdaten beeinflusst wird, bietet es sich an, die Eignungsklassen auf

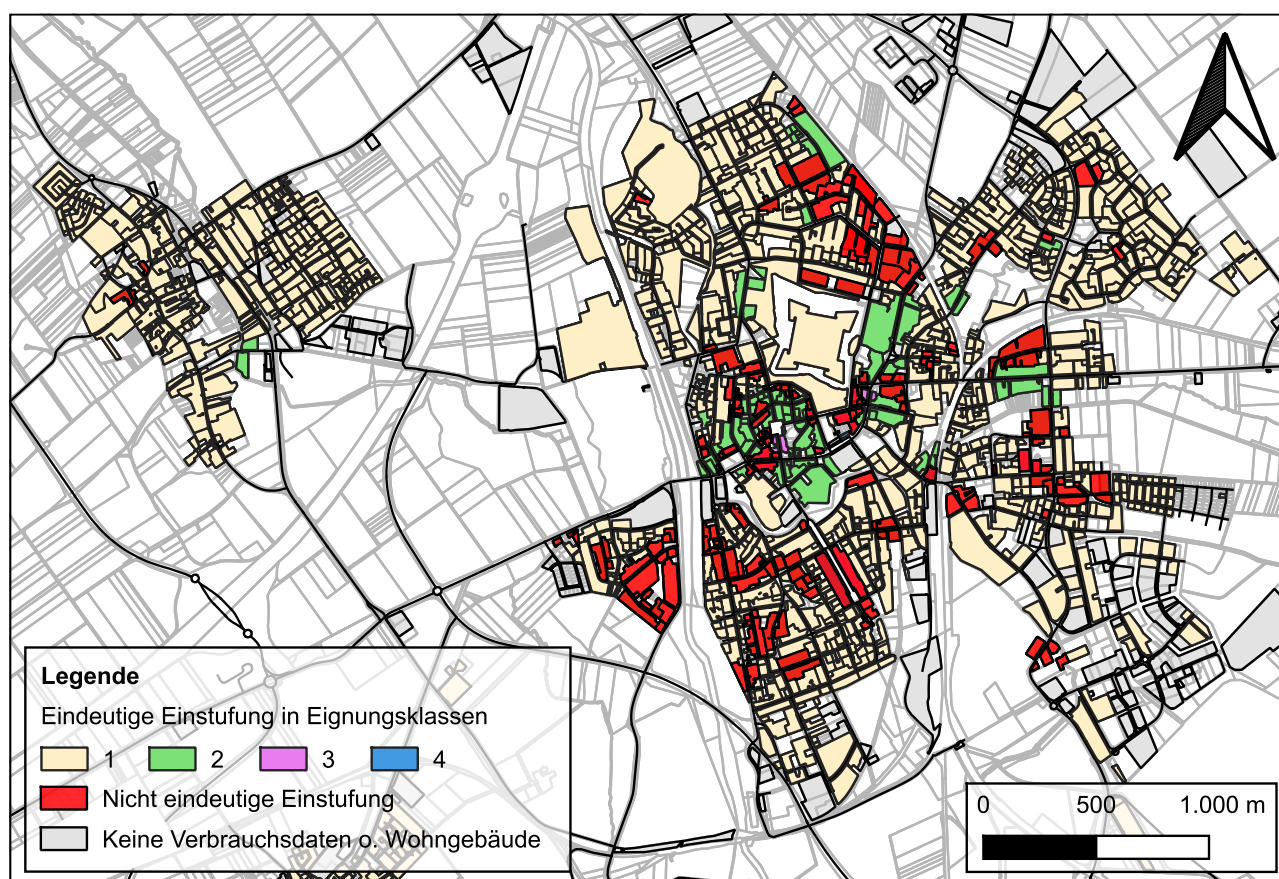


Abb. 2: Urban Energy Units im Stadtgebiet von Jülich und Einstufung in Wärmenetz-Eignungsklassen (s. 2).

verschiedenen Wegen zu berechnen und die Unterschiede zu analysieren. Folgende Optionen werden hier verfolgt:

1. Berechnung der UEU-Wärmelinienindichte aus Bedarfsdaten des Landes NRW und
2. Berechnung der UEU-Wärmelinienindichte aus mit dem Verbrauch kalibrierten Bedarfsdaten, wobei die Kalibrierung der Sanierungstiefe a) gebäudescharf, b) straßenzugsweise und c) stadtweit vorgenommen wird.

Die drei Varianten der Verbrauchskalibrierung werden genutzt, da gebäudescharfe Verbrauchsdaten wie oben beschrieben üblicherweise nicht verfügbar sind. So lässt sich hier nicht nur die Eignung der UEU-Methode, sondern auch der Einfluss der Nutzung aggregierter Verbrauchsdaten für die KWP bewerten. Um die Ergebnisse nicht durch Datenlücken oder methodische Unterschiede zu beeinflussen, werden für alle Auswertungen nur Wohngebäude mit Verbrauchswerten berücksichtigt. Enthält eine UEU auch Nichtwohngebäude oder Gebäude ohne Verbrauchswerte, wird der Bezugswert (Straßenlänge) nur anteilig berücksichtigt.

Aus dieser Berechnung ergeben sich die in Abb. 2 und Tab. 3 aufgeführten Klassifizierungen für die 1386 beurteilten UEUs im Stadtgebiet. Tab. 4 vergleicht die Eingliederungen paarweise nach Berechnungsoptionen, um zu veranschaulichen, wie viele der UEUs, die nicht von vornherein als ungeeignet erscheinen ( $> 0,5 \text{ MWh m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ), bei geänderter Berechnung ihre Einstufung ändern.

Tab. 3: Anzahl der den jeweiligen Eignungsklassen zugeordneten UEUs je Berechnungsoption.

Option	Kl. 1	Kl. 2	Kl. 3	Kl. 4
1 (NRW-Daten)	1066	95	13	6
2a ( $f_{\text{ret}}$ pro Adresse)	1074	91	12	3
2b ( $f_{\text{ret}}$ pro Straße)	1107	64	8	1
2c ( $f_{\text{ret}}$ stadtweit)	957	206	11	6

Tab. 4: Paarweiser Vergleich abweichender Zahl von Eignungsklassenzuordnung nach Berechnungsoptionen. Prozentangaben bezogen auf Minimaleinheiten mit Wärmelinienindichten von mehr als  $0,5 \text{ MWh m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ .

Klasse n. → kleiner als ↓	Opt. 1	Opt. 2a	Opt. 2b	Opt. 2c
Opt. 1	-	27 19,3 %	46 32,9 %	11 7,9 %
Opt. 2a	18 12,9 %	-	34 24,3 %	2 1,4 %
Opt. 2b	8 5,7 %	3 2,1 %	-	2 1,4 %
Opt. 2c	49 35,0 %	50 35,7 %	79 56,4 %	-

Auffällig ist, dass die Kalibrierung auf Stadtebene (Option 2c) dazu führt, dass mehr UEUs in Klasse 2 einsortiert werden. Ein Grund dafür sind größere Verbraucher (wie z. B. schlecht sanierter MFH-Bestand), die den über

alle Gebäude gemittelt berechneten  $f_{\text{ret}}$ -Wert auch für lose MFH- und große EFH-Bebauung andernorts verringern, welche dadurch die Schwelle überschreiten.

Auf Straßenebene (2b) macht sich dies nicht bemerkbar. Hier treten die Unterschiede vor allem bei längeren Straßenzügen zutage, von denen einzelne Straßenabschnitte mit knapp oberhalb der Schwellwerte befindlichen Wärmelinienindichten „geglättet“ werden.

Der Vergleich zwischen NRW-Daten (1) und Gebäudekalibrierung (2a) zeigt ähnliche Werte in Tab. 3, jedoch signifikante Abweichungen von  $> 10 \%$  in Tab. 4. Hier ist zu vermuten, dass die Anzahl zugewiesener Sanierungen zwar insgesamt stimmt, diese jedoch nicht unbedingt auf das richtige Gebäude innerhalb des Blocks und damit ggf. auch auf fehlerhafte Straßenabschnitte platziert werden.

#### 4. Diskussion

Die vorgestellten Ergebnisse für die Berechnung der UEU-Parameter und ihre Klassifikation werden im Folgenden diskutiert. Schlussfolgerungen daraus für die KWP sowie die Eignung von Datenquellen sowie Berechnungs- und Clustering-Methoden für die Transformation lokaler Wärmeenergiesysteme werden herausgearbeitet.

##### Zuverlässigkeit der Berechnung

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf einer von den NRW-Wärmeplanungsdaten unabhängigen Berechnungsweise. Lediglich Teile der Datengrundlage sind gleich. Daher wurden die berechneten Wärmebedarfswerte zunächst mit den offenen Bedarfsdaten verglichen. Sowohl für den gesamten Wärmebedarf von Wohngebäuden (278,5 zu 251,0 GWh) als auch für die Klassifizierung in Tab. 3 ergeben sich sehr ähnliche Zahlenwerte, sodass die berechneten Ergebnisse als plausibel eingestuft werden.

Gleichzeitig zeigt sich, dass die Zuverlässigkeit der Berechnung der UEU-Wärmebedarfe von der Kombination einer Modellierung auf Basis offener und öffentlicher Daten mit lokalen Daten (hier: Verbrauchsdaten vom Versorger) gegenüber der für die NRW-Daten gewählten Vorgehensweise mit teilweise aggregierten Daten profitiert. Ein Anteil von über 10 % der als grundsätzlich für Wärmenetze in Frage kommenden UEUs (mit Wärmelinienindichten von über  $0,5 \text{ MWh m}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in allen Berechnungsweisen) wurde in unterschiedliche Eignungsklassen nach Leitfadens Wärmeplanung eingestuft.

Für die anderen beiden in Tab. 1 genannten UEU-Parameter gilt: Der Lastprofiltyp lässt sich entweder aus Versorgerdaten (sofern die zugeordneten Standardlastprofile bekannt sind) oder aus öffentlichen Daten (Funktionen im Kataster, OpenStreetMap) erschließen. Für Vorlauftemperaturen, die aus spezifischen Wärmebedarfen erschlossen werden können, müssen Bedarfe mit in der Regel nur aus Geodaten berechenbaren Nutzflächen kombiniert werden. Auch hier ist eine Kombination aus Geo- und Energiedaten folglich geboten.

##### Rückschlüsse auf Wärmeplanungsdaten

All dies führt zu der Erkenntnis, dass eine wo möglich **adressscharfe** (sofern nach WPG erlaubt, d. h. für Nichtwohngebäude und Verbraucher  $> 50 \text{ MWh a}^{-1}$  [9]) **und ansonsten nur auf Blockseiten aggregierte** Übergabe von **Verbrauchsdaten für genaue Ergebnisse in der KWP unverzichtbar** ist. Außerdem muss klar bekannt sein, an welchen Adressen überhaupt Verbräuche vorliegen. Dass dies in der Praxis oft nicht erfolgt

(Aggregationen auf große Hausnummernbereiche sind erfahrungsgemäß die Regel), schränkt die Eignung von KWP-Ergebnissen für Folgeschritte wie Machbarkeitsstudien für Wärmenetze oder die Identifikation von Engstellen im Stromnetz durch neue Wärmepumpen unnötig ein.

### Clustering-Kriterien

Im Zuge der Optimierung des Gesamtsystems werden die Minimaleinheiten zu Zellen zusammengefügt. Als mögliche Methoden dafür werden wie oben genannt

- Voronoi-Diagramme via Nähe zu Transformatoren,
- Clustering-Algorithmen, Kantengenerierung via Nähe,
- Clustering-Algorithmen, Kanten aus Straßendaten

untersucht. Kriterien für die Beurteilung sind:

- Vorteilhaftigkeit des Zusammenschließens gerade dieser UEs, z. B. für die Erschließungspraxis,
- Schnittstellen für lokale Energiesystemoptimierung,
- Deutschlandweite Verfügbarkeit notwendiger Daten.

Die Erfüllung der Kriterien zeigt Tab. 5. Transformatorbezogene Voronoi-Diagramme sind zwar für die Sektorkopplung in der Energiesystemoptimierung praktisch, da jedoch eine vorhandene Niederspannungs-Transformator-Region nicht notwendigerweise einer Wärmenetzzone entspricht, ist die Erschließungspraxis nicht gegeben. Zudem fehlen deutschlandweite Daten. Die anderen beiden Methoden erfüllen die Kriterien im Mittel gleichermaßen gut. Für die Energiesystemoptimierung sind in beiden Fällen Anpassungen notwendig, da die Sektorkopplung bei ungleicher Zellgröße komplizierter zu händeln ist. Während das straßenorientierte Clustering für die Erschließungspraxis besser geeignet ist, wird es in manchen Bundesländern (z. B. Niedersachsen, Bayern) durch fehlende offene Adresspunktdaten erschwert, die für ein nähebasiertes Clustering nicht zwingend notwendig sind. Jedoch können Adressdaten bundesweit erworben werden, sodass dieser Aspekt als weniger wichtig eingeschätzt wird.

Tab. 5: Erfüllung der Bewertungskriterien für drei Clustering-Methoden.

Kriterium ↓ Methode →	a	b	c
1	-	(x)	x
2	x	(x)	(x)
3	-	x	(x)

Schlussfolgernd erscheint ein Clustering der UEs auf Basis von Straßengeometrieverknüpfungen am vielversprechendsten und wird für die nächsten Projektschritte prioritär verfolgt.

## 5. Zusammenfassung

Der notwendige umfangreiche Umbau der lokalen Energieinfrastruktur für die Wärmewende, insbesondere für Wärmenetze, erfordert eine zielgerichtete und optimierte Allokation von Investitionsmitteln. Ein zellulärer Aufbau kann ein Weg sein, um vielfältige und veränderliche Versorgungsanforderungen effizient zu erfüllen. Dessen Zellen lassen sich bereits frühzeitig während der kommunalen Wärmeplanung (KWP) definieren. In diesem Beitrag wurde am Beispiel der Stadt Jülich eine Methodik zur effizienten Aufbereitung vielfältiger Gebietsdaten und der darauf aufbauenden Definition von Minimaleinheiten bzw. Urban Energy Units (UEUs) vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zuverlässigkeit der Berechnung der

UEU-Parameter von der Kombination einer Modellierung auf Basis offener und öffentlicher Daten mit nicht-öffentlichen Messdaten (insb. Verbrauchsdaten vom Versorger) profitiert. Dies lässt auch Rückschlüsse auf die Datenaufbereitung für die KWP zu, deren Ergebnisse durch die aktuell vorherrschende zu starke Aggregation von Verbrauchsdaten nur eingeschränkt weiterverwendbar sind. Für die an die UEU-Definition anschließende Zellbildung wurden verschiedene Wege bewertet. Clustering auf Basis von Straßengeometriedaten wurde als am besten geeignet identifiziert, um Eingangsdaten für die nachfolgende Energiesystemoptimierung zu liefern.

## Danksagung

Die Autoren danken den Stadtwerken Jülich für die Zusammenarbeit und die Bereitstellung der Verbrauchsdaten sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) für die Förderung im Rahmen des Forschungsprojekts PreJuCells (FKZ 03EN3113B).

## Literatur

- [1] L. Blanco, A. Alhamwi, B. Schiricke und B. Hoffschmidt, "Data-driven classification of Urban Energy Units for district-level heating and electricity demand analysis," *Sustainable Cities and Society*, Jg. 101, S. 105075, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2023.105075.
- [2] J. Dettmar, C. Drebes und S. Sieber, Hg. *Energetische Stadtraumtypen: Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen*, 2. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2020.
- [3] J. Simonsson, K. T. Atta und W. Birk, "Reduced-Order Modeling of Thermal Dynamics in District Energy Networks using Spectral Clustering," in *2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Trieste, Italy, 2022, S. 144–150, doi: 10.1109/CCTA49430.2022.9965996.
- [4] L. Blanco, P. Groesdonk, J. Estevam Schmiedt und B. Hoffschmidt, "Automated Generation of Building Stock Databases and High-Resolution Heat Load Profiles for Districts and Municipalities in Germany," 2024, doi: 10.34726/7587.
- [5] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*, 2. Aufl. Darmstadt: IWU, 2015.
- [6] Michael Hörner und Julian Bischof, "Typologie der Nichtwohngebäude in Deutschland - Methodik, Anwendung und Ausblick," 2022, doi: 10.13140/RG.2.2.31628.80008.
- [7] Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen. "Daten kommunale Wärmeplanung." Zugriff am: 10. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/energie/kwp/](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/energie/kwp/)
- [8] S. Ortner et al., "Leitfaden Wärmeplanung: Empfehlungen zur methodischen Vorgehensweise für Kommunen und andere Planungsverantwortliche," Heidelberg, Freiburg, Stuttgart, Berlin, 2024.
- [9] A. Bartsch und J. Voigt, "Rechtsgutachten zur Datenaggregation nach dem Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (WPG)," dena, Berlin, 2025.