

BESTIMMUNG ENERGETISCH ZUSAMMENHÄNGENDER URBANER GEBÄUDEGRUPPEN ALS GRUNDLAGE FÜR DIE QUARTIERSPLANUNG

Verena WEILER*¹, Jann WEINAND*², Sally KÖHLER*¹, Russell McKENNA²,
Ursula EICKER¹, Wolf FICHTNER²

¹ Institut für angewandte Forschung nachhaltige Energietechnik, HFT Stuttgart,
Schellingstraße 24, 70174 Stuttgart, +49 711 8926 2950, verena.weiler@hft-stuttgart.de,
sally.koehler@hft-stuttgart.de, ursula.eicker@hft-stuttgart.de,
www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/index.html/de

² Lehrstuhl für Energiewirtschaft, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle
Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe,
+49 721 608 44444, jann.weinand@kit.edu, russell.mckenna@kit.edu, wolf.fichtner@kit.edu
https://www.iip.kit.edu/86_3602.php

Kurzfassung: In der vorliegenden Untersuchung wird ein Vorgehen zur Identifikation von Gebäudegruppen mittels Clusteranalyse vorgestellt. Mithilfe einer Clusteranalyse werden Gebäude innerhalb eines gewählten Stadtquartiers anhand energetischer, geographischer und gebäudegeometrischer Indikatoren in Cluster eingeteilt. Dabei wird nicht nur ein Indikator, sondern auch die Wechselwirkungen mehrerer Indikatoren untereinander betrachtet, die für die energetische Einteilung der Gebäude relevant sind. Es zeigt sich, dass die Clusteranalyse aussagekräftigere Ergebnisse liefert als die Einteilung nach herkömmlichen Gebäudetypologien, die Gebäude i.d.R. nur nach einem oder wenigen Indikatoren gruppieren und keine Wechselwirkungen berücksichtigen.

Keywords: Clusteranalyse, Gebäudesimulation, Stadtquartiere, energetische Indikatoren

1. Einleitung

Urbane Räume weisen verschiedene energetische Merkmale, wie die Einwohner- und Gewerbedichte, sowie wirtschaftliche Aktivitäten und Infrastrukturen auf. Insgesamt leben auf nur ca. 2% der Landfläche der Erde ungefähr 54% der Weltbevölkerung in Städten (UN HABITAT, 2016). Diese sind für über 60% des weltweiten Energiebedarfs sowie etwa 70% der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich (UN HABITAT III, 2016). Gleichzeitig haben sich Regierungen weltweit das Ziel gesetzt, die CO₂-Emissionen um bis zu 95% zu reduzieren. Aufgrund dieser Zusammenhänge ist eine Auseinandersetzung mit Energieeffizienz- und CO₂-Reduktionsmaßnahmen insbesondere in Städten von weitreichender Bedeutung. Zur Erreichung des CO₂-Reduktionsziels der Europäischen Union von 80% gegenüber dem Jahr 1990 bis 2050, ist eine Reduktion der CO₂-Emissionen in allen emissionsintensiven Bereichen notwendig, insbesondere im Bereich der Stromerzeugung, der Industrie, des Verkehrs und der Haushalte (European Commission, 2011). Eine nachhaltige Stadtquartiersplanung kann in diesen genannten Bereichen maßgeblich zum CO₂-Reduktionsziel beitragen. Dazu sollen sektorübergreifende Einflüsse auf Energiebereitstellungs- sowie Energiebedarfsstrukturen analysiert werden, um Stadtquartiere so nachhaltig und effizient wie möglich zu konzipieren.

Zur Berechnung und Simulation kann jedoch nicht jedes Gebäude im Einzelfall untersucht werden. Eine Einteilung in Gebäude- und Quartierstypologien, die die genannten Einflussfaktoren berücksichtigen, ist ein wichtiger Ansatz für die Umsetzung einer nachhaltigen Quartiersplanung.

Gebäudetypologien werden in der Regel anhand „durchschnittlicher Gebäude“ als Klassen definiert. Diese durchschnittlichen Gebäude werden dann meist über eine statistische Verteilung auf Stadtquartiere hochskaliert (Dall’O et. al. 2012). Darüber hinaus werden die Analysen in vielen Studien zu Quartieren auf bestehende Verwaltungsgrenzen bezogen. Auch im Themenfeld der „Urban Morphology“ sind meist Einteilungen des Zensus Grundlage für die Analyse. So wird beispielsweise in Sarralde et al. (2015) das Potential für erneuerbare Energien für vom Zensus festgelegte Quartiere in London berechnet. Diese Verfahren können eine gute erste Einschätzung verschiedener Größen abgeben, sind aber zu ungenau. Hier könnte eine umgekehrte Herangehensweise vorteilhaft sein, bei der zunächst einzelne Gebäude analysiert werden und dann erst nachträglich die Verwaltungsgrenzen festgelegt werden.

In der vorliegenden Untersuchung wird daher ein Vorgehen zur Identifikation von Gebäudegruppen mittels Clusteranalyse vorgestellt. Mithilfe der Clusteranalyse werden Gebäude innerhalb eines gewählten Stadtquartiers anhand energetischer, geographischer, gebäudegeometrischer und stadtstruktureller Indikatoren in Cluster eingeteilt. Bei dieser Gebäudegruppierung wird nicht nur ein Indikator, sondern auch die Wechselwirkungen mehrerer Indikatoren untereinander betrachtet. Dadurch ergeben sich andere Gebäudegruppen als in Gebäudetypologien wie bspw. TABULA, die nur wenige Indikatoren wie Gebäudealter und Gebäudetyp zur Klassifizierung nutzen (Loga et al. 2016).

Diese Studie soll zeigen, ob eine Gruppierung der Gebäude mittels Clusteranalyse und den nachfolgend genannten Indikatoren als ganzheitlicher Ansatz zu schlüssigen Ergebnissen führt und somit im Weiteren zur strategischen Entscheidungsunterstützung bei der nachhaltigen Quartiersplanung in Städten und Kommunen dienen kann.

Die Auswahl der Indikatoren sowie die Durchführung der Clusteranalyse werden in Kapitel 2 erläutert. Im daran anschließenden Kapitel 3 werden die Ergebnisse beschrieben und analysiert bevor die hier angewandte Methodik sowie die Ergebnisse in Kapitel 4 diskutiert und ein Ausblick gegeben wird.

2. Methodik

Die Methodik gliedert sich in die Auswahl der Indikatoren sowie der Fallstudie (vgl. Kapitel 2.1), die Faktorenanalyse (vgl. Kapitel 2.2) und die Clusteranalyse (vgl. Kapitel 2.3). Die angewandte Methodik basiert auf der in Weinand et al. (2018) ausführlich erläuterten Methodik. Daher wird im Folgenden nur auf einige für diese Untersuchung besonders relevante Bereiche explizit eingegangen.

2.1. Auswahl der Indikatoren und der Fallstudie

Zur Charakterisierung eines bestehenden Gebäudes sind vor allem die baulichen Eigenschaften wie Baujahr, mittlerer U-Wert der Gebäudehülle sowie die Grund- und Nutzfläche (=beheizte Fläche) des Gebäudes relevant. Des Weiteren sind Verbrauchswerte

wie Strom-, Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf wichtige Indikatoren. Eine Übersicht über alle angewandten Indikatoren findet sich in Abbildung 1 in Kapitel 2.2.

In der vorliegenden Analyse wird auf die geometrische Darstellung eines Stadtquartiers im CityGML-Format zurückgegriffen. Einige der in dieser Studie verwendeten Indikatoren, wie z.B. das Gebäudebaujahr oder die Gebäudenutzung, können direkt aus der GML-Datei entnommen werden.

Mit der von der HFT Stuttgart entwickelten energetischen Simulationsplattform SimStadt (Nouvel et. al. 2015) können basierend auf den geometrischen und geografischen Informationen der CityGML-Dateien verschiedene gebäudescharfe, technische Indikatoren berechnet werden. SimStadt enthält Simulationsmodelle der ebenfalls an der HFT Stuttgart entwickelten Software INSEL (INSEL 2018).

So errechnet sich der mittlere U-Wert der Gebäudehülle aus der Gebäudegeometrie sowie den typischen Materialien dieses Gebäudetyps und Gebäudealters. Weiterhin errechnet SimStadt den Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf anhand des Monatsbilanzverfahrens laut DIN V 18599. Der Strombedarf wird ebenfalls anhand von Kenngrößen nach DIN V 18599 berechnet. Das PV-Potential sowie die Nennleistung der platzierbaren PV-Module werden unter anderem mittels der Gebäude-, insbesondere der Dachgeometrie, lokalen Wetterdaten sowie verschiedenen in SimStadt definierbaren Parametern, wie bspw. dem Aufstellwinkel der Module, berechnet. Die Arbeitsschritte sowie die zugehörigen Berechnungsmodelle werden in Romero Rodriguez et. al. (2017) beschrieben.

Der Indikator „Bebauungsdichte“ wird aus dem Verhältnis der bebauten Fläche zur unbebauten Fläche eines Blocks gewonnen. Diese Werte werden mit Hilfe der Software QGIS aus Open Street Map (OSM) Daten des Regierungsbezirks Stuttgart errechnet (Geofabrik 2017).

Als Fallstudie wird das Stuttgarter Stadtquartier Stöckach ausgewählt. Dies ist ein, vor allem hinsichtlich der Altersstruktur (BMW 2014), für Deutschland typischer Stadtteil. Von den 1175 Gebäuden im Quartier gehen 788 Gebäude und Gebäudeteile als Objekte in die Clusteranalyse ein, da für die übrigen Objekte keine vollständige Datenbasis vorliegt.

Die untersuchten Gebäude teilen sich in 415 Wohngebäude und 373 Nichtwohngebäude auf. Aus den 788 Objekten werden bei der Harmonisierung der CityGML-Daten und der OSM-Daten 763 Gebäude, da die Datengrundlagen nicht zu 100% übereinstimmen und daher an manchen Positionen in der CityGML-Datei Gebäude stehen, an denen in den OSM-Daten keine sind bzw. vice versa.

Die mit SimStadt durchgeführten Simulationen für das hier untersuchte Gebiet sind mit Messdaten auf Blockebene validiert und können daher als zuverlässig angesehen werden.

2.2. Faktorenanalyse

Abbildung 1 zeigt die Zuordnung der Indikatoren zu den Faktoren, die sich aus der Faktorenanalyse ergeben. Für eine ausführliche Erläuterung der Faktorenanalyse sei an dieser Stelle auf Weinand et al. (2018) verwiesen. Der Indikator „Bebauungsdichte“ ist der einzige Indikator, der nicht durch die Faktoren beschrieben wird, da seine Faktorladung für jeden Faktor sehr gering ist. Das bedeutet, dass dieser Indikator nicht mehr in die weitere

Analyse einbezogen wird. Abbildung 1 zeigt ebenfalls die Größe der Faktorenladung aller Indikatoren für jeden Faktor. Die Ergebnisse können als plausibel bewertet werden, da die Indikatoren, die jeweils einem Faktor zugeordnet sind, inhaltlich zusammenpassen. Beispielsweise zeigt sich eine hohe Korrelation zwischen den Indikatoren „Strombedarf“, „Potentieller PV-Ertrag“, „Nennleistung der platzierbaren Module“, „Grundfläche“ und dem „Gesamten Raumwärme- und Warmwasserbedarf“. Diese Indikatoren sind alle dem Faktor 1 zugeordnet.

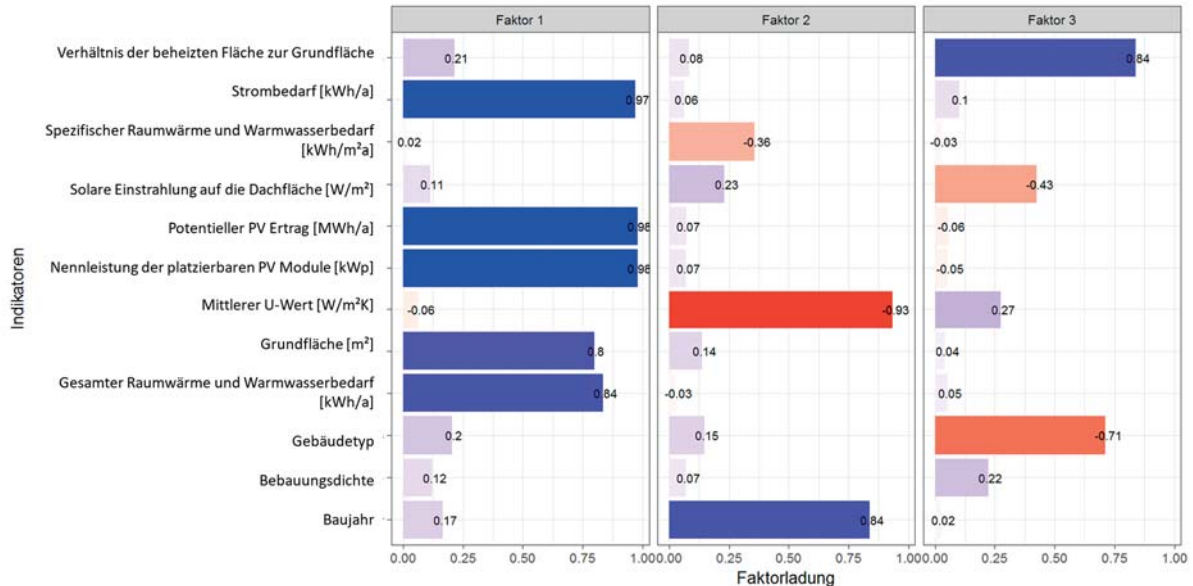


Abbildung 1: Zuordnung der Indikatoren mit den jeweiligen Faktorladungen zu den drei Faktoren. Die Skala verläuft von -1 (dunkelrot) bis 1 (dunkelblau)

2.3. Clusteranalyse

Bei dem hier angewandten hierarchisch-agglomerativen Clusteranalyse-Verfahren muss die Clusteranzahl exogen vorgegeben werden. Diese Anzahl wird in dieser Studie mit Hilfe von 25 Validationsmethoden und dem „Ellenbogen“-Kriterium bestimmt (vgl. Weinand et al. 2018). Die Ergebnisse der Faktorenanalyse werden als Input für die Clusteranalyse verwendet.

Die 25 Validationsmethoden ergeben ganz unterschiedliche Werte für die Anzahl der Cluster. In Charrad et al. (2014) wird die „majority rule“ zur Ermittlung der Clusteranzahl vorgeschlagen. Diese sieht vor, dass die Clusteranzahl sich an dem häufigsten Ergebnis aus den 25 Methoden orientiert. Mit sieben Nennungen entspricht hier die Clusteranzahl in Höhe von sechs Clustern dem häufigsten Ergebnis.

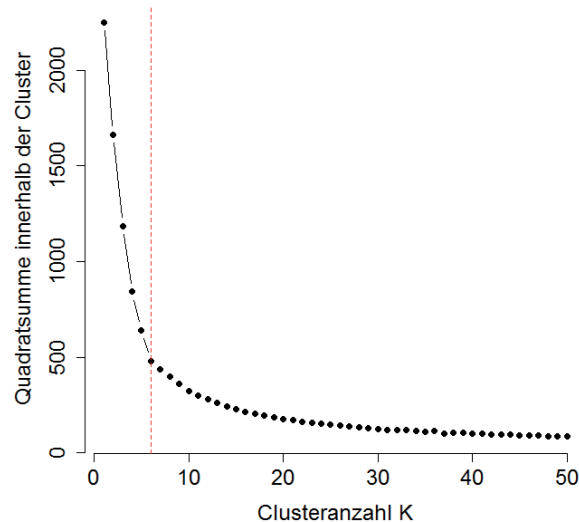


Abbildung 2: Quadratsumme innerhalb der Cluster in Abhängigkeit von der Clusteranzahl

Mit Hilfe der Ellenbogenmethode kann die mit den Validationsindizes bestimmte Anzahl an Clustern bestätigt werden. Die Methode basiert auf der Funktion der Quadratsumme innerhalb der Cluster, wie in Abbildung 2 gezeigt, wobei der Ellenbogen den Punkt der abnehmenden Grenzrenditen darstellt. Das bedeutet, dass direkt hinter dem Ellenbogen, mit zunehmender Anzahl von Clustern, der Informationszuwachs sehr gering ist. In der Abbildung 2 ist der Ellenbogen deutlich erkennbar bei einer Clusteranzahl in Höhe von sechs Clustern (rote Linie in Abbildung). Diese Anzahl wird daher im Folgenden als Clusteranzahl übernommen.

3. Ergebnisse der Clusteranalysen

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der Clusteranalysen mit allen Gebäuden im Quartier und dann die Ergebnisse der Clusteranalyse mit allen Wohngebäuden aufgezeigt. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Wohngebäude-Analyse in Kapitel 3.2.1 mit einzelnen Indikatoren verglichen sowie in Kapitel 3.2.2 mit einer bestehenden Typologie.

3.1. Clusteranalyse mit allen Gebäuden in Stöckach

Um verschiedene Methoden der Clusteranalyse zu testen und am ausgewählten Fallbeispiel zu bewerten, wurden mehrere Analysen durchgeführt, die alle betrachteten Gebäude des Quartiers enthalten. Die Clusteranalyse wurde einmal mit einer vorangegangenen Faktorenanalyse durchgeführt und einmal ohne eine solche. Bei der letzteren Untersuchung sind die Unterschiede zwischen den Clustern geringer und es lassen sich weniger Gemeinsamkeiten unter den Gebäuden im gleichen Clusters erkennen. Außerdem sind die Unterschiede zwischen den jeweiligen Maximal- und Minimalwerten der Indikatoren innerhalb eines Clusters in der Regel größer. Die Ergebnisse sind in diesem Fall insgesamt weniger aussagekräftig als bei den Untersuchungen mit einer vorangegangenen Faktorenanalyse, auf denen im Folgenden der Fokus liegen soll.

Die Zuordnung der Gebäude zu den sechs Clustern ist in Abbildung 3 zu sehen. Zur vollständigen Darstellung des Stadtquartiers wurden in allen Abbildungen in Kapitel 3 auch die nicht-simulierten Gebäude des Quartiers in weiß dargestellt.

Auffällig sind die gelb dargestellten Gebäude des Clusters 5, obwohl es nur 26 von insgesamt 763 Gebäuden sind. Die meisten dieser Gebäude sind Nichtwohngebäude und weisen eine große Grundfläche von durchschnittlich 2.000 m² auf.

Exemplarisch wird auf zwei weitere Cluster aus der Clusteranalyse genauer eingegangen (siehe dazu auch Tabelle 1). Cluster 2 ist mit einer Objektanzahl von 311 der größte Cluster, jedoch beträgt die durchschnittliche Grundfläche hier nur knapp 200 m². Die überwiegende Anzahl der Objekte sind Wohngebäude mit dem durchschnittlichen Baujahr 1963, einem mittleren U-Wert von 1,29 W/(m²K) sowie einem spezifischen Wärmebedarf von 142 kWh/(m²a). Die Bandbreite des Baujahrs innerhalb dieses Clusters bewegt sich von 1913 bis 2012, wobei der größte Teil der Gebäude in den Bereichen 1950-1960 und 1974-1978 liegt. Dies lässt darauf schließen, dass die Einteilung der Gebäude nur nach Baujahren für eine energetische Quartiersanalyse nicht ausreichend ist.



Abbildung 3: Clusteranalyse mit Faktorenanalyse mit sechs Clustern für alle Gebäude im Quartier

Cluster 6 beinhaltet nur ein Nichtwohngebäude, das als Ausreißer klassifiziert werden kann. Dieses Gebäude weist den mit Abstand höchsten spezifischen Heizwärmebedarf, das größte PV-Potential sowie die größte Fläche eines einzelnen Gebäudes auf. Da sich dieses Gebäude sehr deutlich von allen anderen unterscheidet, wird es hier in einem eigenen Cluster isoliert.

Tabelle 1: Mittelwerte der einzelnen Indikatoren je Cluster bei einer Clusteranalyse mit Faktorenanalyse

Cluster	Baujahr	Nutzung (1=Wohn- gebäude, 2=Nichtwohn- gebäude)	Mittlerer Grundfläche [m ²]	Mittlerer U-Wert [W/m ² K]	Verhältnis der beheizen Fläche zur Grundfläche	spez. Heizwärme- und TWW- Bedarf [kWh/m ² a]	Gesamter Heizwärme- und TWW- Bedarf [kWh/a]	Nenn- leistung der plazierbaren PV- Module [kWp]	Potential [MWh/a]	Solare Ein- strahlung auf die Dachfläche [W/m ²]	Strombedarf [kWh/a]	Bebauungs- dichte	Anzahl Gebäude
1	1989	2	223,0	0,73	1,52	101,37	42.636	9,17	9,87	144,23	9.867	0,37	164
2	1963	1,12	199,4	1,29	3,33	142,53	97.208	7,30	7,64	139,34	19.128	0,41	311
3	1958	2	197,5	1,25	1,38	132,00	45.357	7,86	8,37	143,13	8.591	0,36	121
4	1999	1,04	244,2	0,78	4,01	88,34	90.059	8,44	8,92	141,31	25.659	0,43	40
5	1996	1,88	2.030,2	0,91	4,62	116,85	1.079.110	86,85	93,08	143,29	238.101	0,51	26
6	1995	2	2.519,3	0,87	1,71	157,23	4.261.217	303,33	327,52	145,00	794.252	0,51	1

3.2. Clusteranalyse mit den Wohngebäuden in Stöckach

Weiter wird als vergleichende Untersuchung die Clusteranalyse ausschließlich für die Wohngebäude im Stadtquartier Stöckach durchgeführt. Diese Untersuchung ist sinnvoll, da in der vorangegangenen Untersuchung mit allen betrachteten Gebäuden nahezu alle Wohngebäude in zwei Cluster eingeteilt sind; die restlichen Cluster bestehen nahezu komplett aus Nichtwohngebäuden. Außerdem ermöglicht die ausschließliche Betrachtung der Wohngebäude einen Vergleich mit bestehenden Wohngebäudetypologien (siehe Kapitel 3.2.2). Für diese Untersuchung wurde ebenfalls eine Clusteranzahl von sechs Clustern gewählt.

3.2.1 Vergleich der Clustergruppen mit einzelnen Indikatoren

Um die Zuteilung der Gebäude zu den Clustern mit einer Gruppierung nach einzelnen Indikatoren zu vergleichen, wurde ein Gebäudeblock, bestehend aus 23 Wohngebäuden, im Detail betrachtet.

In Abbildung 4 (a) ist als Ergebnis die Aufteilung dieser Gebäude nach der Clusteranalyse zu sehen, gefolgt von einer Gruppierung nach Baujahr (b), dem spezifischen Heizwärmebedarf (c) sowie dem mittleren U-Wert der Gebäudehülle (d). Diese drei Indikatoren wurden hier beispielhaft zum Vergleich ausgewählt, da sie energetisch besonders relevant sind.

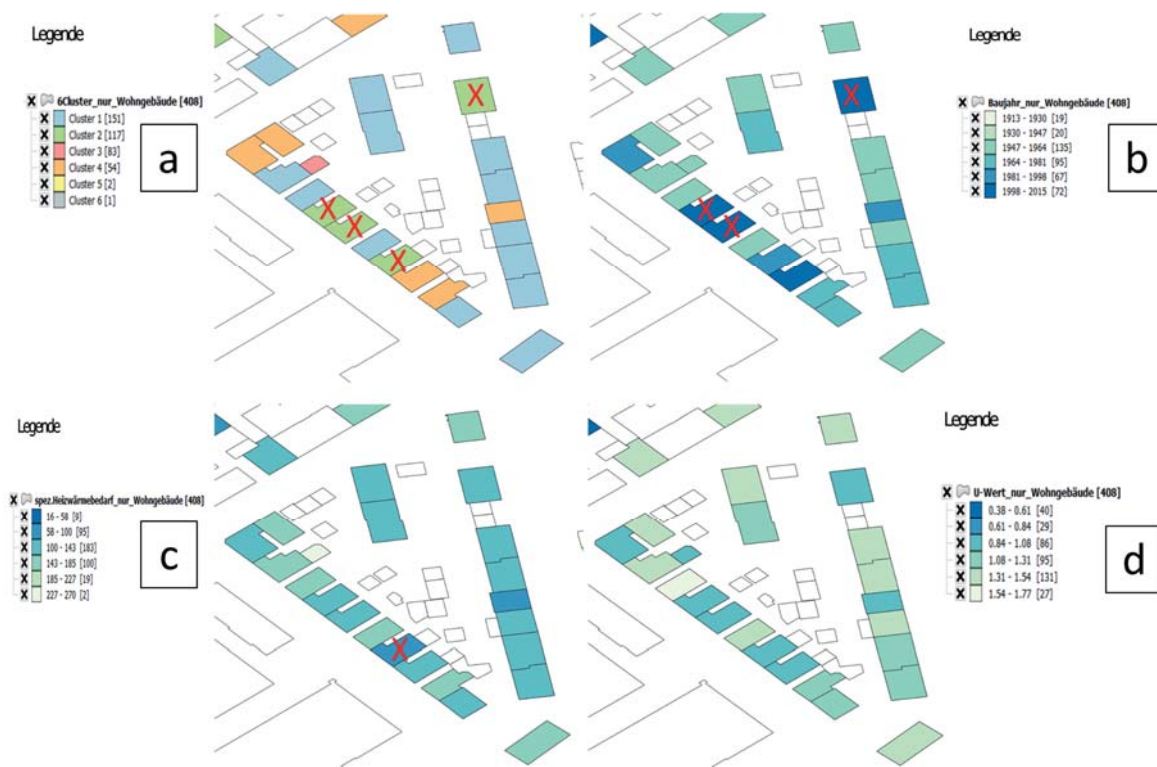


Abbildung 4: Einteilung eines Ausschnitts nach Clustern (a), Baujahr (b), spezifischem Wärmebedarf (c) und mittlerem U-Wert (d). Rote Kreuze markieren weiter untersuchte Gebäude.

Die Farbgebung wurde den Indikatoren angepasst, d.h. die jeweils dunkelsten Blautöne entsprechen dem niedrigsten (=besten) mittleren U-Wert, dem niedrigsten spezifischen Wärmebedarf und dem jüngsten Baujahr.

Die Abbildung zeigt, dass nicht alle Gebäude jeweils zu den Besten der verschiedenen Indikatoren gehören. So gibt es relativ neue Gebäude, die einen höheren spezifischen Heizwärmebedarf aufweisen, als andere, ältere Gebäude. Durch das Clustern der Gebäude nach diesen und anderen Indikatoren können solche Unterschiede geglättet werden, und sowohl neue Gebäude als auch Gebäude mit einem niedrigen spezifischen Heizwärmebedarf werden dem gleichen Cluster zugeteilt (in Abbildung 4 durch rote Kreuze dargestellt).

In einem weiteren, hier nicht dargestellten, Block zeigt sich, dass Gebäude mit dem Baujahr 1928 dem gleichen Cluster zugeordnet sind wie andere Gebäude im selben Block, die im Jahr 2009 gebaut wurden. Außerdem besitzen sie eine ähnliche Grundfläche sowie beheizte Fläche. Die Einteilung in den gleichen Cluster ist hier also sinnvoll. Generell kann gesagt werden, dass sehr alte sowie sehr neue Gebäude energetisch sehr ähnlich sein können, was einer reinen Klassifizierung der Gebäude nach Baujahr widerspricht (siehe Aksoezen et al. 2015).

3.2.2 Vergleich mit einer bestehenden Typologisierung von Wohngebäuden

Im Rahmen der EU-Projekte „TABULA“ und „EPISCOPE“ wurde eine Typologisierung von deutschen Wohngebäuden vorgenommen. Dabei sind die Wohngebäude in 50 verschiedene Referenzgebäude eingeteilt. Die Einteilung erfolgt in die Gruppen Ein- und Mehrfamilienhäuser, Reihenhäuser und große Mehrfamilienhäuser sowie einige Sondertypen, die jeweils in mehrere Baualterklassen unterteilt sind. Für jedes dieser Referenzgebäude sind typische Kennwerte angegeben (Loga et al. 2015).

Die Gebäude des bereits in Kapitel 3.2.1 untersuchten Gebäudeblocks sind mit diesen Typologievorschlägen untersucht und klassifiziert worden. Als zur Verfügung stehende Eingangsgrößen zur Typologisierung der Gebäude werden die Indikatoren gewählt, die auch in üblichen GIS-Dateien vorhanden sind: Baujahr, Gebäudegrundfläche und Anzahl der Geschosse. In Abbildung 5 sowie in Tabelle 2 ist das Ergebnis dieser Einteilung zu sehen.

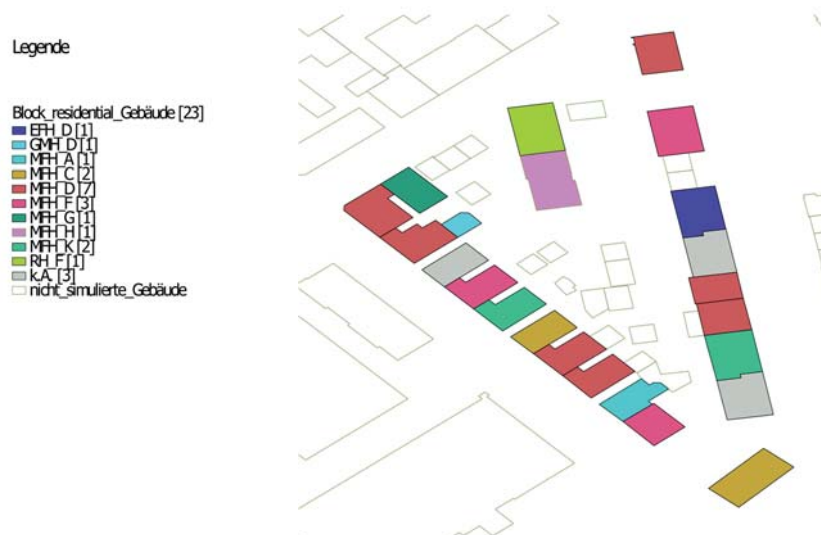


Abbildung 5: Typisierung des Beispielgebäudeblocks nach TABULA

Tabelle 2: Vergleich von Gruppen- bzw. Clustereinteilung der Wohngebäude eines Blocks

Cluster	Gruppierung nach TABULA	Baujahr	Grundfläche [m ²]	Anzahl Geschosse	Cluster	Gruppierung nach TABULA	Baujahr	Grundfläche [m ²]	Anzahl Geschosse
1	GMH_D	1954	143	4,9	1	keine Auswahl	1976	214	3,3
1	MFH_C	1974	110	3,2	2	keine Auswahl	2001	127	5,0
1	MFH_D	1955	114	5,3	2	keine Auswahl	1986	126	4,9
1	MFH_D	1953	113	5,0	2	MFH_A	1999	178	3,9
1	MFH_D	1977	179	3,4	2	MFH_K	2010	124	4,8
1	MFH_D	1956	156	3,4	4	MFH_C	1987	109	3,9
1	MFH_D	1956	171	3,5	4	MFH_D	1952	124	5,0
1	MFH_D	1959	187	3,4	4	MFH_H	1984	158	5,0
1	MFH_F	1977	165	3,3	4	MFH_K	2010	125	4,7
1	MFH_F	1956	129	3,6	4	RH_F	1974	116	2,4
1	MFH_F	1960	134	3,6	3	EFH_D	1952	45	0,6
1	MFH_G	1954	190	3,4					

Nach TABULA werden die 23 Gebäude des Blocks in elf verschiedene Gruppen eingeteilt, wobei sieben Gebäude der gleichen Gruppe MFH_D angehören. Des Weiteren gibt es sechs Gruppen, die jeweils nur aus einem Gebäude bestehen. Darüber hinaus kann für drei Gebäude keine Auswahl getroffen werden, weil anhand der untersuchten Parameter keine eindeutige Zuweisung zu einem Referenzgebäude möglich ist.

Sechs der sieben Gebäude in der Gruppe MFH_D befinden sich im Cluster 1, das verbleibende MFH_D-Gebäude wurde jedoch zu Cluster 4 zugeordnet. Cluster 1 besteht neben den MFH_D-Gebäuden weiterhin aus den Gruppierungen GMH_D, MFH_C, MFH_F, MFH_G, und einem Gebäude, bei dem mit der TABULA Einteilung keine Auswahl getroffen werden konnte.

Noch deutlicher fallen die Unterschiede der beiden Methoden bei Cluster 4 auf. Dieser Cluster beinhaltet nach der Clusteranalyse fünf Gebäude dieses Blocks, diese Gebäude sind jedoch nach TABULA jeweils einer anderen Gruppe zugeordnet.

Bei der Clusteranalyse definiert das Baujahr eines Gebäudes nicht ausschließlich den Cluster, was jedoch das erste Kriterium bei der Einteilung nach TABULA ist. So sind z.B. in Cluster 1 Gebäude der Baujahre 1953-1977 vertreten, die nach TABULA nicht in einer Gruppe sein können, da in der Regel die Einteilung der Gebäude in 10-Jahres-Abständen erfolgt. Auch in Cluster 4 ist dies deutlich zu sehen, hier werden durch die Clusteranalyse Gebäude mit den Baujahren 1952-2010 demselben Cluster zugeteilt.

Bei einem direkten Vergleich der Gebäude und ihrer jeweiligen Zuteilung nach der Clusteranalyse bzw. der TABULA Typologisierung lassen sich folglich deutliche Unterschiede erkennen. Die Zuteilung der Gebäude zu jeweils einem der 50 Referenzgebäude vermittelt zunächst eine hohe Genauigkeit und Individualität, die bei genauerer Betrachtung der jeweiligen Gebäude aber teilweise zu einer starken Vereinfachung und Einschränkung führt.

4. Diskussion und Ausblick

In den hier vorgestellten Untersuchungen geht es vor allem um eine sinnvolle Einteilung von Gebäuden innerhalb eines Stadtquartiers anhand von energetischen Gesichtspunkten. Dafür wurde eine Gebäude-Simulationsplattform mit der Methode der Clusteranalyse kombiniert und die Ergebnisse ausgewertet. Die Gebäude, deren Werte für jeden Indikator individuell berechnet werden, werden mithilfe der Clusteranalyse in sinnvolle Cluster eingeteilt. Die Einteilung findet hier nicht nur nach einem einzelnen Indikator statt, sondern bezieht sich auf 13 Indikatoren. Dies stellt einen Mehrwert gegenüber der Einteilung anhand von nur einem Indikator oder sehr wenigen Indikatoren dar.

Allerdings ist der Zweck einer solchen Typologie der Vergleich des gesamten Gebäudebestandes verschiedener europäischer Länder untereinander und nicht eine gebäudescharfe Betrachtung von Stadtquartieren. Der heterogene Gebäudebestand in einem gewachsenen Stadtquartier kann in der Regel nicht eins zu eins in die 50 in TABULA definierten Referenzgebäude unterteilt werden. Die Gebäude sollten daher individuell betrachtet und im Anschluss in verschiedene Gruppen eingeteilt werden, da sonst starke Vereinfachungen stattfinden.

Für eine Einteilung von Gebäuden in einem Stadtquartier nach energetischen Gesichtspunkten resultieren daher aufgrund von belastbaren und miteinander wechselwirkenden Indikatoren aussagekräftigere Ergebnisse mit Hilfe des Clusterverfahrens.

Bei der Einteilung von Objekten in Gruppen oder Cluster, kann es passieren, dass einige Gebäude, die sich in vielerlei Hinsicht ähneln, jeweils an der Ober- bzw. Untergrenze von benachbarten Clustern oder Gruppen liegen. Genauso kann es sein, dass Gebäude an der Ober- bzw. Untergrenze eines Clusters oder einer Gruppe sich nicht sehr stark ähneln. Dies stellt jedoch ein grundsätzliches Problem bei der Einteilung in Gruppen o.ä. dar. Durch die Wahl einer sinnvollen Clusteranzahl (siehe Kapitel 2.3) können die Effekte hier jedoch in Grenzen gehalten werden.

Anschließend an diese Untersuchung soll die vorgestellte Methodik auf verschiedene Stadtquartiere angewandt werden. Dabei soll der Fokus auf der Bewertung und dem Vergleich von Stadtquartieren liegen. Bei einer Analyse in diesem Maßstab können weitere Indikatoren mit einbezogen werden, bei denen die Zuordnung zu einzelnen Gebäuden nicht möglich ist. Dazu gehören soziale Indikatoren, wie Einwohner- oder Einkommensstruktur, sowie mehr städtebauliche Indikatoren, wie der Anteil an Grünflächen, CO₂-Quellen oder das vorhandene Potential an verschiedenen erneuerbaren Energien.

Mit Hilfe dieser und noch folgender Analysen soll die nachhaltige Stadtquartiersplanung unterstützt, Potenziale aufgezeigt und die Entscheidungsfindung auf kommunaler Ebene unterstützt werden.

Literaturverzeichnis

- Aksoezen, M., Daniel, M., Hassler, U., Kohler, N. (2015): Building age as an indicator for energy consumption. In: *Energy and Buildings* 87, pp. 74-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.074>.
- BMWi (2014): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Sanierungsbedarf im Gebäudebestand. Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Berlin 2014.
- Charrad, M.; Ghazzali, N.; Boiteau, V.; Niknafs, A. (2014): NbClust. An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. In: *J. Stat. Soft.* 61 (6). DOI: 10.18637/jss.v061.i06.
- Dall'O, G.; Galante, A.; Torri, M. (2010): A methodology for the energy performance classification of residential building stock on urban scale. In: *Energy and Buildings* 48, S. 211-219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.034>.
- European Commission (2011): The roadmap for transforming the EU into a competitive, low-carbon economy by 2050. Abgerufen am 15. Januar 2018 von https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/2050_roadmap_en.pdf.
- Geofabrik (2017): Open Street Map Datensatz des Regierungsbezirk Stuttgart. Abgerufen am 06. November 2017 von <http://download.geofabrik.de/europe/germany/baden-wuerttemberg/stuttgart-regbez.html>.
- INSEL: INTeGrated Simulation Environment Language. Abgerufen am 15. Januar 2018 von www.insel.eu.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N. & Born, R. (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Darmstadt.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N. (2016): TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable. In: *Energy and Buildings* 132, S. 4–12. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.094.
- Nouvel, R.; Brassel, K.-H.; Bruse, M.; Duminil, E.; Coors, V.; Eicker, U.; Robinson, D. (2015): SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models. CISBAT 2015 Lausanne, Switzerland.
- Romero Rodriguez, L.; Duminil, E.; Sanchez Ramos, J.; Eicker, U. (2017): Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. In: *Solar Energy* 146, pp. 264-275. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.043>.
- Sarralde, J.J.; Quinn, D. J.; Wiesmann, D.; Steemers, K. (2015): Solar energy and urban morphology. Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. In: *Renewable Energy* 73, S. 10–17. DOI: 10.1016/j.renene.2014.06.028.
- Scott, A. J.; Symons, M. J. (1971): Clustering Methods Based on Likelihood Ratio Criteria. In *Biometrics* 27 (2), p. 387. DOI: 10.2307/2529003.

- UN HABITAT. (2016): Urbanization and Development: Emerging Futures. United Nations Settlements Programme. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). Abgerufen am 15. Januar 2018 von <https://unhabitat.org/wp-content/uploads/2014/03/WCR-%20Full-Report-2016.pdf>.
- UN HABITAT III. (2016): The new urban agenda. (T. U. Development, Hrsg.). Abgerufen am 15. Januar 2018 von <http://habitat3.org/the-new-urban-agenda/>.
- Weinand, J. M.; McKenna, R.; Fichtner, W. (2018): Developing a municipality typology for modelling decentralised energy systems. Working Paper Series in Production and Energy, Institute for Industrial Production, Karlsruhe Institute for Technology, Paper 26, <https://www.iip.kit.edu/2117.php>, ISSN 2196-7296.