

EIN ONLINE-TOOL ZUR ERPROBUNG BEZAHLBARER HANDLUNGSOPTIONEN FÜR ENERGIEEFFIZIENZ IM LÄNDLICHEN RAUM

U. Cämmerer-Seibel¹, G. Kiesel¹, C. Völker¹ und D. Cebulla²

¹Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Deutschland

²Jena-Geos, Jena, Deutschland

KURZFASSUNG/ABSTRACT

Im ländlichen Raum sind kaum Vorarbeiten mit dem Ziel eines übergreifenden Wärme- und Energiekonzeptes vorhanden. Kleinen Gemeinden fehlen meist die Kompetenz und finanzielle Mittel, um aus eigener Kraft die komplexen Prozesse in Zusammenhang mit der Energiewende aktiv angehen zu können. Politische Entscheidungsprozesse sowie unklare Finanzierungsstrukturen bremsen die Einbettung von Energiestrategien in die lokale Wirtschaftsentwicklung. Aus diesen Gründen wurde im Verbundforschungsprojekt „TRAIL“ ein Online-Tool für kleine Gemeinden entwickelt, das basierend auf freien Geo- und Statistikdaten den Strom- und Wärmebedarf visualisiert. Um die Hürden möglichst gering zu halten, werden nur ein aktueller Internetbrowser und einen Internetzugang für die Nutzung benötigt.

In rural areas there is hardly any expertise in an overall energy transition process. Small communities generally lack the skills and financial resources to actively tackle the complex processes associated with energy transition. Political decision-making processes and unclear financing structures slow down the embedding of energy strategies in local economic development. In a collaborative research project “TRAIL”, an online tool was developed to visualize the electricity and heat demand using free geographic and statistical data. To keep the hurdles as low as possible, only a current browser is required for use.

EINFÜHRUNG

Im November 2019 hat der Deutsche Bundestag das Bundes-Klimaschutzgesetz (Bundesregierung 2019) beschlossen. Dieses Gesetz schreibt erstmals das Klimaschutzziel fest, die Treibhausgasemissionen um mindestens 55% bis 2030 gegenüber 1990 zu vermindern. Darüber hinaus wird in diesem Gesetz das Bekenntnis formuliert, bis zum Jahr 2050 für Deutschland die Treibhausgasneutralität zu erreichen. Dafür müssen unter anderem Instrumente und Methoden entwickelt werden, die auch kleineren Kommunen helfen, klima- und energiepolitischen Fragestellungen nachhaltig zu beantworten. Fehlinvestitionen, zum Beispiel in fossile Energien und Strukturen oder veraltete Systeme, sind zu vermeiden und alle handelnden Akteure vor Ort, von der Verwaltung über die Wirtschaft sowie

verschiedenen Interessengruppen bis hin zu Privatpersonen in diese Prozesse intensiver einzubinden (Sperling et al. 2011).

Im städtischen Maßstab funktioniert dieser komplexe Prozess bereits recht gut, jedoch gibt es, insbesondere bei Mitwirkung mehrerer Stakeholder, eine Reihe von Hindernissen, die es zu überwinden gilt. Auf kommunaler Ebene wird die Komplexität des Themas, insbesondere durch die Anzahl und Diversität der handelnden Akteure, unterschiedliche Betrachtungsskalen, Verknüpfungen und Unsicherheiten in Prozess, Methoden und grundlegenden Definitionen besonders deutlich (Cajot et al. 2017). Viele Studien haben sich mit dem Thema Energieplanung und Energieeffizienz im städtischen Maßstab befasst (Zanon und Verones 2013) und argumentieren, dass Energieeffizienz "durch die Verbindung der Gebäudeskala mit der städtischen angegangen werden muss".

Die Zuständigkeit für die Energieplanung hat sich von einer begrenzten Gruppe von Spezialisten, einschließlich Behörden und Verwaltung auf verschiedenen Ebenen, auf betroffene Unternehmen und Anlagenbetreiber sowie viele weiteren Akteuren erweitert. Die führende Rolle der Kommunen als zentrale Organisationseinheit für die Energiewende und Energieplanung (Sperling et al. 2011) wird deshalb immer bedeutungsvoller.

Die besonderen Herausforderungen zum Einstieg in die Energiewende auf kommunaler Ebene – insbesondere im ländlichen Raum - sind in der oft hohen technischen Komplexität (Kirnats et al. 2018), politisch komplexen Entscheidungen und unklaren Finanzierungsstrukturen begründet. Planungen erfordern in der Regel ein hohes Fachwissen und erhebliche Ressourcen in Bezug auf Kosten, Zeit und Personal.

Fast alle Forschungsvorhaben zur Energiewende im urbanen Raum beziehen sich ausschließlich auf städtische Gebiete und sind mit Smart-City-Initiativen verbunden. Langsam steigt der Fokus jedoch auch auf ländliche Gebiete, wie die Diskussion um "intelligente Dörfer" (Poggi et al. 2018) zeigt. Das ist nicht verwunderlich, denn 90 Prozent der Fläche der EU sind ländlich oder überwiegend ländlich geprägt und etwas mehr als die Hälfte der europäischen Bevölkerung lebt in Gegenden, die unter diese Definition fallen (Eurostat regional yearbook 2019).

Deshalb beschreibt die OECD (2012) die Erfordernis zur Verknüpfung der Potenziale erneuerbarer Energien mit der ländlichen Entwicklung. Daher sollten auch Schlüsselfaktoren, wie z.B. die Integration von neuen Energiestrategien in die jeweilige lokale Wirtschaftsentwicklung betrachtet werden. Diese Potenziale sind, bis auf wenige Leuchtturmprojekte, die meist von privaten Initiativen initiiert werden (Pfenning (2018), Becker und Naumann (2016)), bisher nur in geringem Maße ausgeschöpft.

Mit der Entwicklung kommunaler Energiepläne wird in Kommunen jeweils die Grundlage für die Analyse und Steigerung der Energieeffizienz gelegt. Energie(verbrauchs/bedarfs)-datenbanken im kommunalen und stadtplanerischen Kontext stützen sich in der Regel auf Daten, die mit geographischen Informationssystemen (GIS) gesammelt, visualisiert und entwickelt werden, um die erforderlichen Informationen für die Erstellung von Energieplanungen bereitzustellen (Ascione et al. 2013).

Für den ländlichen Raum wurde dieses Verfahren jedoch bisher nicht umgesetzt, da es in einem frühen Planungsstadium oft qualitativ hochwertige Energiedaten und hohe Investitionen in Fachwissen benötigt. Selbst frei zugängliche Online-Tools, die dem ländlichen Raum mit sofort verfügbaren Ergebnissen und Empfehlungen in frühen strategischen Planungsphasen helfen könnten, existieren nicht (Benedek et al. 2018).

Geographische Informationssysteme (GIS) wurden als Werkzeuge für die stadtenergetische Planung in verschiedenen Forschungen ((Byrne et al. 2008), (Ascione et al. 2013), (Bugs et al. 2010)), hauptsächlich als Instrument für Energieaudits von Gebäuden genutzt. Sie ermöglichen, Informationen über urbane Zusammenhänge in verschiedenen Ebenen für Energieanalysen, Forschungen und Planungen zu sammeln (Ascione et al. 2013). und – je nach Verwendungszweck – gefilterte Informationen zusammenzustellen.

Alle derzeit verfügbaren GIS-basierten Lösungen (vgl. z.B. (HOTMAPS 2018) oder (ECOSPEED AG 2018)) haben grundsätzlich andere Herangehensweisen, sind kosten- und personalintensiv und konzentrieren sich hauptsächlich auf städtische Gebiete. Eine Auswertung von 900 deutschen Energieforschungsprojekten von (Kirnats et al. 2018) zeigte zudem, dass diese Forschungsprojekte in den meisten Fällen keine breite Praxisanwendung finden. Vor allem fehlen systematische Ansätze zur ganzheitlichen Modellierung des Gesamtsystems unter Einbeziehung aktiver Nutzer und integrierter Energiesysteme (Kirnats et al. 2018).

Methodik

Der Ansatz der Autoren, der auf eben diesen Herausforderungen zur Umsetzung der zukünftigen Energieplanungen im ländlichen Raum basiert, wurde

als Aufgabenstellung für das Projekt TRAIL (TRANSformation Im Ländlichen Raum 2017-2019, www.trail-energie.de) definiert. Das Forschungsprojekt wurde von sechs Partnern aus Wissenschaft und Praxis initiiert und umgesetzt. Gerade die Kombination von theoretischem und praktischem Know-how war wichtig, um ein Entscheidungs-Unterstützungs-Tool für lokale Nutzer und Entscheidungsträger auf Gemeindeebene zu entwickeln und zu realisieren. Ziel war es, kleine Kommunen mit weniger als 10.000 Einwohnern in die Lage zu versetzen, erste Schritte auf dem Weg hin zu mehr und besserer Energieeffizienz ohne überbordenden personellen und finanziellen Aufwand zu wagen und dabei die Hürden für den Einstieg in dieses Thema so niedrig wie möglich zu gestalten.

Vier typische ländliche Kommunen (die Stadt Kahla mit ca. 6.900, die Gemeinden Werther mit ca. 3.200, Großbrungen mit ca. 900 und Neumark mit nur ca. 500 Einwohnern) im Bundesland Thüringen beteiligten sich an dem Projekt, um aus ihrer Sicht notwendige Anforderungen an ein derartiges Hilfsmittel zu formulieren, die jeweiligen Entwicklungsstände zu testen, Nutzungserfahrungen einzubringen und das TRAIL Online-Tool kontinuierlich zu bewerten.

Das TRAIL-Tool wird in drei Versionen (TRAILstarter, TRAILplus und TRAILpro) entwickelt, ein Ansatz, um auf die unterschiedliche Anspruchsniveaus der Gemeinden zu reagieren. TRAILstarter beinhaltet kartographisch aufbereitete Informationen zum Wärme- und Strombedarf für Wohngebäude innerhalb einer Gemeinde. Diese werden aufgrund von Kennzahlen überschlägig berechnet und auf Basis der räumlichen Verfügbarkeit der Datengrundlage in einem 100x100m-Gitternetz dargestellt (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2017)). Den Rasterzellen sind statistische Daten der Gemeinden und öffentlich zugängliche Daten (GIS, Zensus) zugeordnet. Anhand dieser Zuordnung kann die Verteilung des Wärme- und Strombedarfs beurteilt und visualisiert werden. Je nach lokaler Verteilung lassen sich Präferenzräume zur weiteren Betrachtung ermitteln. Die Versionen TRAILplus und TRAILpro sind noch in der Entwicklung und werden an dieser Stelle nicht vertieft.

Alle Datenverarbeitungsalgorithmen sind in der Programmiersprache R (R Team (2017)), geschrieben. Die folgenden Pakete wurden dazu verwendet: *sf* (Pebesma 2018b), *rgdal*, *lwgeom* (Pebesma 2018a), *spdep* (Bivand et al. 2013) und *raster* (Hijmans 2017). Der Datenverarbeitungsansatz ist in TRAILstarter implementiert und seine Teilschritte werden anschließend erläutert. Die Vorteile des gewählten Ansatzes sind, dass keine Datenerhebung durch die Gemeinde erforderlich ist und die Ergebnisse direkt verfügbar sind.

Die durch das TRAIL-Tool verwendeten Wärmebedarfskennwerte stammen aus der Tabula-

Studie des IWU und gelten für Gebäudealtersklassen eines bestimmten Gebäudetyps (Loga et al.(2012)). Die Bestimmung des Energiebedarfs basiert auf dem Wissen über die richtigen Wohngebäudetypen. Jeder Typ hat seinen spezifischen Bedarf pro Quadratmeter Wohnfläche. Der Bedarf wird von verschiedenen Faktoren wie Gebäudegröße, Anzahl der Stockwerke, Bestandszeitraum und Anzahl der Nachbargebäude beeinflusst.

Für die Berechnung wurde daher als Grundlage ein Algorithmus entwickelt, welcher eine Datenbank mit den räumlich verorteten Gebäuden erstellt und diese typisiert. Dafür wurden fünf verschiedene Typen von Wohngebäuden ausgewählt (geordnet nach Größe und Einwohnern): Einfamilien-/Zweifamilienhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus und Hochhaus ((Loga et al. (2012)).

Der Klassifikationsansatz basiert ausschließlich auf Open-Source-Daten des Thüringer Landesamts für Boden und Geoinformation (TLBG). Verwendet werden Gebäudeumrisse, Flurstücke, Adresskoordinaten und 3D-Gebäude in LOD2 (Gröger et al. (2012)). Die Auswahl der Daten erfolgte aufgrund der räumlichen Lage der Modellkommunen in Thüringen. Bei entsprechender Datenverfügbarkeit ist der Ansatz auch auf Gebiete außerhalb Thüringens anwendbar. Der Ablauf der Datenverarbeitung der Klassifizierung ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

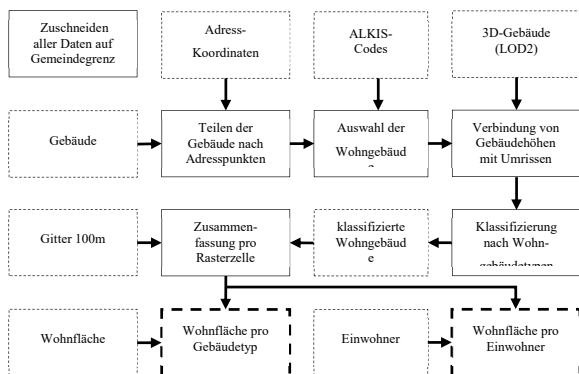


Abbildung 1: Klassifizierungsalgorithmus von Gebäudetypen

Bei Mehrfamilienhäusern, die aus verschiedenen Eingängen bestehen, wird für die Energiebedarfsabschätzung jeder Eingang als eigenes Haus gezählt. Da als Datengrundlage jedoch nur Umriss der gesamten Gebäude vorlagen, werden im ersten Schritt diese Gebäudeumrisse anhand der entsprechenden Adresskoordinaten in einzelne Gebäude aufgeteilt. (Abbildung 2).



Abbildung 2: Aufteilen von Gebäudeumrissen pro Adresskoordinaten

Dafür werden Schnittlinien mittig zwischen den Adresspunkten senkrecht zur Verbindung der Koordinaten erstellt und die Gebäudepolygone an diesen Linien geteilt. Die Definition der Gebäude nach ALKIS dient anschließend dazu, die Wohngebäude zu identifizieren und zu selektieren.

Die eigentliche Klassifikation der Wohngebäude in die fünf Gebäudetypen folgt einem Entscheidungsbaum-Ansatz. Basierend auf Angaben zur Gebäudehöhe der Bruttogrundfläche und der Angabe freistehend/nicht freistehend, lassen sich die Gebäude aufgrund definierter Schwellenwerte der Thüringer Bauordnung den jeweiligen Klassen zuordnen (Thüringer Landtag 13.03.2014). Ein Beispiel der Klassifizierung siehe Abbildung 3:

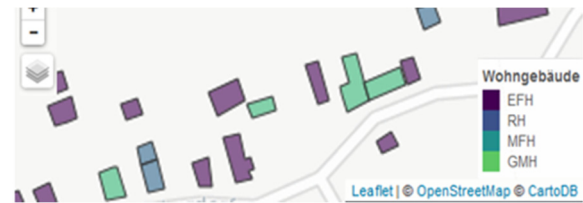


Abbildung 3: Klassifizierung des Gebäudetyps

So ist z.B. ein Gebäude als Einfamilienhaus anzusehen, wenn es eine Gebäudehöhe kleiner gleich 9m aufweist, eine Bruttogrundfläche kleiner gleich 400 m² besitzt und freistehend ist. Wichtig ist hierbei, dass die Gebäudetypisierung als Grundlage für die Bedarfsberechnung erfolgt. Es ist damit nicht relevant, dass die Klassifikation in allen Fällen der tatsächlichen Nutzung entspricht, sondern dass die Gebäude einen typischen Wärmebedarf entsprechend der bestimmten Gebäudetypen aufzeigen.

Mit der Kenntnis der Gebäudetypen werden anschließend diese Zuordnung pro Rasterzelle bestimmt und die Wohnfläche pro Typ und pro Einwohner je Zelle berechnet. Die Wohnflächen je Gebäudetyp pro Rasterzelle sind letztendlich die Grundlage für die weitere Berechnung des Wärme- und Strombedarfs. Dafür werden die folgenden Daten verwendet: Einwohnerzahl, Anzahl der Gebäude in verschiedenen Gebäudealtersklassen und Anzahl der Haushalte in verschiedenen Kategorien aus dem Zensus des Jahres 2011 (zeitlich große Differenz zu den Geodaten, jedoch liegen nur hier die Daten pro Rasterzelle vor (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011), Koeffizienten für den Wärmebedarf nach Gebäudealtersklasse (Loga et al. 2012) und Koeffizienten für den Strombedarf nach Haushaltskategorie (Statistisches Bundesamt 2019).

Berechnung des Wärmebedarfs

Zur Ermittlung des Wärmebedarfs wird der Anteil der Gebäude in verschiedenen Gebäudealtersklassen aus Zensus-Daten mit den Bedarfskennwerten der zugehörigen Gebäudealtersklassen aus Tabula verrechnet (vgl. Abbildung 4) (Loga et al.(2012)).

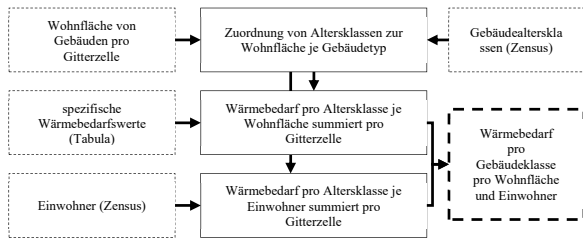


Abbildung 4: Berechnung des Wärmebedarfs

Basierend darauf wird die folgende Formel verwendet, um den gesamten Wärmebedarf $B_{Wärme ges.}$ pro Gitterzelle zu berechnen:

$$B_{Wärme ges.} = A_{Wohnen} \cdot Q_{Gebäudealter} \cdot C_{Wärme} \quad (6)$$

Dabei ist A_{Wohnen} die Wohnfläche pro Gebäudetyt, $Q_{Gebäudealter}$ der prozentuale Anteil von Gebäuden pro Gebäudealtersklasse und $C_{Wärme}$ der entsprechende Wärmebedarfskoeffizient pro Quadratmeter Wohnfläche pro Gebäudetyt je Gebäudealtersklasse.

Zusätzlich zum Gesamtbedarf pro Zelle wird der Wärmebedarf pro Quadratmeter $B_{Wärme m^2}$ und Einwohner $B_{Wärme EW}$ nach folgenden Formeln berechnet:

$$B_{Wärme m^2} = \frac{B_{Wärme gesamt}}{A_{Wohnen}} \quad (7)$$

und

$$B_{Wärme EW} = \frac{B_{Wärme gesamt}}{n_{EW}} \quad (8)$$

Wobei n_{EW} die Zahl der Einwohner aus den Zensusdaten für jede Rasterzelle beschreibt. Die obigen Berechnungen führen zu einer Karte mit Wärmebedarfen wie im Beispiel in Abbildung 5.

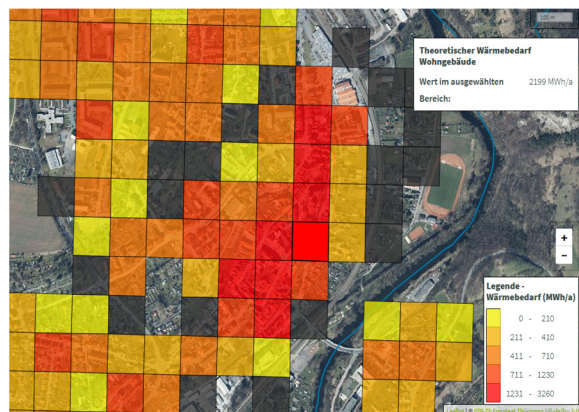


Abbildung 5: Beispielkarte des Wärmebedarfs

Berechnung des Strombedarfs

Die Berechnung des Strombedarfs erfolgt nicht aufgrund von Kennwerten je m² Wohnfläche sondern basiert auf Kennwerten zu Bedarfen von unterschiedlichen Haushaltsgrößen (vgl. Abbildung 6) (Statistisches Bundesamt (2019)). Die Anzahl der Haushalte wurde in den Kategorien 1 Person, 2 Personen und mindestens 3 Personen zusammengefasst.

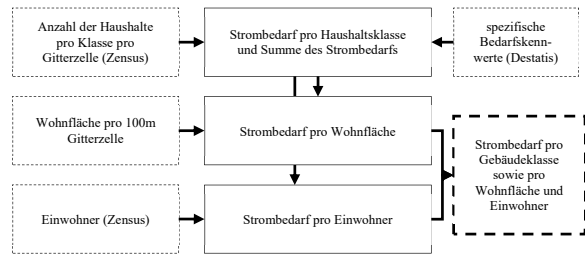


Abbildung 6: Berechnung des Strombedarfs

Der Strombedarf $B_{Strom gesamt}$ pro Gitterzelle wird auf der Grundlage der Anzahl der Haushalte je Kategorie pro Gitterzelle $n_{Haushalte}$ und den Strombedarfskennwerten C_{Strom} berechnet:

$$B_{Strom gesamt} = n_{Haushalte} \cdot C_{Strom} \quad (9)$$

Der Strombedarf pro Wohnfläche und pro Einwohner berechnet sich analog zum Wärmebedarf. Die obige Berechnung führt zu einer Karte mit Strombedarfen wie im Beispiel in Abbildung 7.

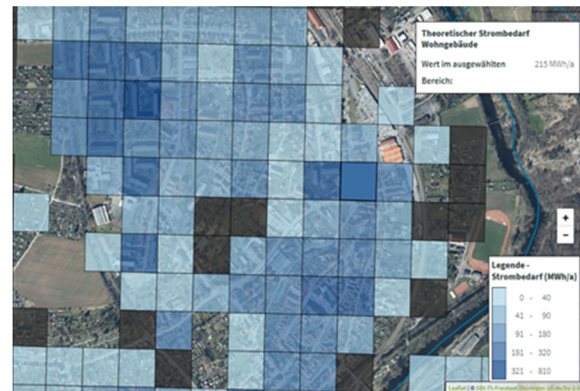


Abbildung 7: Beispielkarte des Strombedarfs

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Für die Überprüfung der gewählten Methodik zur Klassifizierung des Gebäudetyps wurden in zwei Modellkommunen Ortsbegehungen durchgeführt und dabei Gebäudeprotokolle erstellt. Zusätzlich wurden die errechneten Wohnflächen und Wärme-Bedarfe mit Ergebnissen aus dem „Kurzverfahren Energieprofil für die einfache energetische Bewertung von Gebäuden“ (KVEP) des Instituts für Wohnen und Umwelt in Darmstadt verglichen (Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU)).

Klassifizierung des Gebäudetyps

Im Juli 2019 wurden in der Modellkommune Kahla im Saale-Holzland-Kreis in Thüringen Ortsbegehungen durchgeführt, um die dem TRAIL-Tool zugrunde liegende Gebäudetypisierung zu prüfen. Kahla hat eine Gemarkungsgröße von 7,96 km², die Statistik zählt 2019 insgesamt 7.028 Einwohner. Laut ALKIS-Datenbank gibt es in Kahla 2.211 Wohngebäude (Thüringer Landesamt für Vermessung 2015).

Aus dieser Datenbank wurden zufällig 100 Gebäude ausgewählt, bei denen ein Adresspunkt hinterlegt ist, kleine Gebäude wie Garagen, Anbauten oder Teilgebäude wurden vorab herausgefiltert. Die Zufallsauswahl wurde in folgende Gruppen proportional zur Gesamtanzahl jedes Gebäudetyps der Grundgesamtheit aufgeteilt: Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhäuser sowie große Mehrfamilienhäuser und Nichtwohngebäude.

Im Rahmen der Vor-Ort-Erfassung wurden je Gebäude die Lage, eine Außenaufnahme sowie die Parameter Gebäudetyp, geschätzte Gebäudehöhe, Altersklasse, Bruttogeschossfläche und Sanierungsstand eingeschätzt und dokumentiert. Zudem wurde jeweils die berechnete Bruttogeschossfläche aus TRAIL zugewiesen und die entsprechende TABULA-Kennzeichnung hinterlegt. Abbildung 8 zeigt ein solches Gebäudeprotokoll.

Gebäudeprotokoll in Kahla Nr.: 1
Adresse: Am Alten Gericht 5
Datum Besichtigung: 05.07.2019
Gebiet oder Gruppe in der Karte: oranger Stern



Datenerfassung	Angaben	Notizen/Anmerkungen
Gebäudetyp vor Ort (WG+Typ./NWG)	EFH	
Gebäudetyp TRAIL	EFH	
Gebäudetyp RE'ASON	unbekannt	
Gebäudehöhe (geschätzt)		
Gebäudehöhe: ≤ 10 m	x	
Gebäudehöhe: 10 m $< x \leq 25$ m		
Gebäudehöhe: ≥ 25 m		
Geschossanzahl:	EG+DG	
Bruttogeschossfläche (geschätzt)		TRAIL A=73 m ²
BGF: ≤ 40 m ²		
BGF: ≤ 400 m ²	x	RE'ASON BP: ca. 114 m ²
BGF: 400 m ² $< x \leq 600$ m ²		
BGF: ≥ 600 m ²		
Sanierungszustand (geschätzt): Neubau/Altbau/energ. saniert	saniert	WDVS+Doppelverglasung
Gebäudealtersklasse (geschätzt):	EFH_G-1979-1993	

Abbildung 8: Gebäudeprotokoll Kahla

Im Ergebnis erkennt das TRAIL-tool 76% der Gebäude korrekt. Von den nicht richtig erkannten Gebäuden sind mehr als die Hälfte Einfamilienhäuser (EFH), von denen wiederum die meisten Gebäude als Mehrfamilienhäuser (MFH) oder große Mehrfamilienhäuser (GMH) eingestuft werden. Diese falsch eingestuften Gebäude sind ausnahmslos ältere Gebäude, die in der Regel über hohe Decken und Dachräume verfügen, die nicht ausgebaut sind. Aus diesem Grunde wird vielfach ein Geschoss zusätzlich in der automatisierten Berechnung der Bruttogeschossflächen berücksichtigt.

Darüber hinaus gibt es unter den falsch erkannten Wohngebäuden solche mit Geschäften im Erdgeschoss, hier liegt eine teilweise gewerbliche Nutzung vor. Diese Gebäude gelten als Wohngebäude, da die überwiegende Nutzung die Wohnnutzung ist.

Untersuchungen mit fast identischen Ergebnissen wurden in einer weiteren Modellkommune (Großobringen im Landkreis Weimarer Land) durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet dort umfasste den kompletten Ort mit einem Wohngebäudebestand von 312 Gebäuden, die sich aufteilen auf 299 Ein- und Zweifamilienhäuser, sowie acht Mehrfamilienhäuser. Nichtwohngebäude, wie z.B. der Kindergarten, die Feuerwehr und das Rathaus, die Kirche sowie Immobilien für Gewerbe, Dienstleistung und Handel wurden in Großobringen nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend kann aus diesen Ergebnissen festgehalten werden, dass die „Klassifizierung des Gebäudetyps“ im TRAIL-tool mit vertretbaren Einschränkungen möglich ist.

Wohnfläche und Wärmebedarf

Grundlage der energetischen Bewertung der Gebäude bilden frei zugängliche Daten, die durch eine Ortsbegehung ergänzt wurden. Mit dem ALKIS-Messmodul (Thüringer Landesamt für Vermessung 2015) wurden die Grundflächen der Gebäude herausgemessen und deren Kompaktheit festgestellt. Anhand der hinterlegten Luftbilder wurden Anbauverhältnisse sowie Dachformen und Dachaufbauten bestimmt. Zudem wurden über vorhandene Dachflächenfenster erste Rückschlüsse auf möglichen Wohnraum unter dem Dach gezogen und Solarthermieanlagen zur Brauchwassererwärmung festgestellt. Historische Luftbilder wurden herangezogen, um eine erste Einordnung der Gebäude hinsichtlich ihres Baualters vornehmen zu können. Entsprechendes Bildmaterial steht im Geoportal Thüringen für die Jahre zwischen 1944 und 1953 und von 1982 bis heute zur Verfügung.

Bei der Ortsbegehung wurde zudem die Bauweise (massiv oder leicht), die Geschossigkeit und die Raumhöhen abgeschätzt. Außerdem wurden Annahmen über die Anzahl der Wohneinheiten, Unterkellerung und das Vorhandensein beheizter Wohnräume in den Dach- und Kellergeschossen getroffen. Auch Anbauten und angrenzende Gebäude wurden in diese Betrachtungen einbezogen. Die Baualtersklasse der Gebäude wurde abgeschätzt und mögliche energetischen Verbesserungsmaßnahmen aufgenommen. Abbildung 9 zeigt das Untersuchungsgebiet der Modellkommune Großobringen mit der Einteilung der Baualtersklassen.

Aus der äußeren Betrachtung des Erscheinungsbildes der Gebäude wurden Rückschlüsse auf mögliche Sanierungsmaßnahmen am Gebäude gezogen. Zur Bewertung der vorhandenen Anlagentechnik wurde der Bezirksschornsteinfegermeister befragt und damit Informationen über Brennstoff, Art, Baujahr und Aufstellraum des Wärmeerzeugers eruiert. Im Neubaugebiet wurde das Baualter des Wärmeerzeugers gleichgesetzt mit dem Baualter des Gebäudes, da bei den Gebäuden dieser Altersklassen kaum davon auszugehen ist, dass der Wärmeerzeuger bereits ausgetauscht wurde. Da nicht für alle Gebäude Informationen zur Anlagentechnik vorlagen, wurden Annahmen getroffen. Bei Gebäuden ab Baujahr 2009

wurde bei mangelnder Angabe der Einsatz von Luft-Wasser-Wärmepumpen unterstellt.

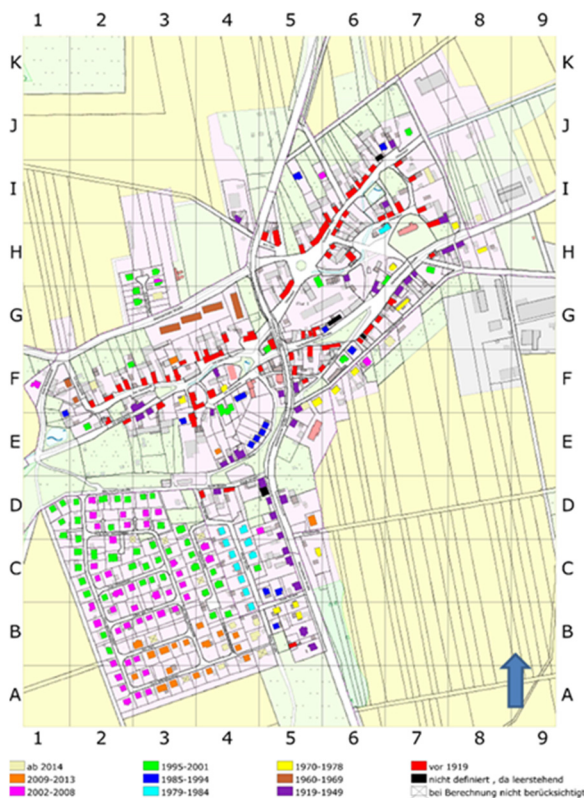


Abbildung 9: Großbringen, Übersicht Baualtersklassen

Bei Gebäuden älteren Datums ohne Information zur Art der Beheizung wurde angenommen, dass Nachtspeicheröfen und Elektrodurchlauferhitzer für die Warmwasserbereitung zum Einsatz kommen. Dies korrespondiert auch mit den Angaben, die aus dem Zensus 2011 ersichtlich sind, wonach 30 Gebäude mit Nachtspeicheröfen beheizt werden (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011).

Die erhobenen Daten wurden in detaillierten Gebäudeprotokollen festgehalten und damit für jedes Gebäude mit dem KVEP eine energetische Bewertung durchgeführt. Dazu werden die spezifischen Daten des Gebäudebestandes in folgenden drei Bereichen eingegeben:

- 1) Flächen der Bauteile im Flächenschätzverfahren in Abhängigkeit von beheizter Wohnfläche, Geschossigkeit, Anbausituation, Geschosshöhe, Art und Form von Keller und Dachgeschoss
- 2) thermische Qualität der Bauteile durch pauschale U-Werte in Abhängigkeit der Baualtersklasse und der Bauweise
- 3) energetische Qualität der Anlagentechnik durch Pauschalwerte für die Anlagentechnik in Abhängigkeit von der Art des Brennstoffs, der Art und des Alters des Wärmeerzeugers für Heizung und Warmwasser sowie des Dämmstandards der Wärmeverteilung.

Die beheizte Wohnfläche als Eingangsgröße wurde dabei aus der Gebäudegrundfläche ermittelt. Dabei wurde bei Vollgeschossen die Bruttogrundfläche, in Abhängigkeit von der Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude, mit einem pauschalen Faktor zwischen 0,73 bei Mehrfamilienhäusern, bis 0,78 bei Einfamilienhäusern, multipliziert. Die Faktoren entstammen Erfahrungswerten der Autoren in Anlehnung an die Wohnflächenermittlung im KVEP. Wohnflächen in Dachgeschossen unter Dachschrägen wurden gemäß den gesetzlichen Vorgaben der Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche in Abhängigkeit von den lichten Raumhöhen ermittelt. Für die Bestimmung beheizter Wohnflächen in Kellergeschossen wurden Annahmen in Abhängigkeit von Gebäudeart und Baualtersklasse getroffen. Wohnraum wurde auch dort berücksichtigt, wo durch den Geländeverlauf Kellergeschosse nur teilweise im Erdreich liegen.

Für Gebäude ab der Baualtersklasse 2002 bis 2009 sind im KVEP keine U-Werte hinterlegt. Daher wurden diese an die höheren Anforderungen der ab 2002 gültigen Energieeinsparverordnung EnEV angepasst. Zudem wurden entsprechend der Wärmebrückenzuschlag, Temperaturfaktoren und der Klimadatensatz aktualisiert.

Nach Eingabe der spezifischen Gebäudedaten des Gebäudebestandes wurden die Berechnungsergebnisse nach Adressdaten den einzelnen Rasterzellen zugeordnet und die gewonnenen Daten aufsummiert. In der Analyse wurden Gebäude, die sich nur teilweise in der Rasterzelle befinden, mit dem entsprechenden Flächenanteil gewertet. Abbildung 10 zeigt den Vergleich der Wohnfläche je 100x100m-Rasterzelle in TRAIL und dem KVEP.

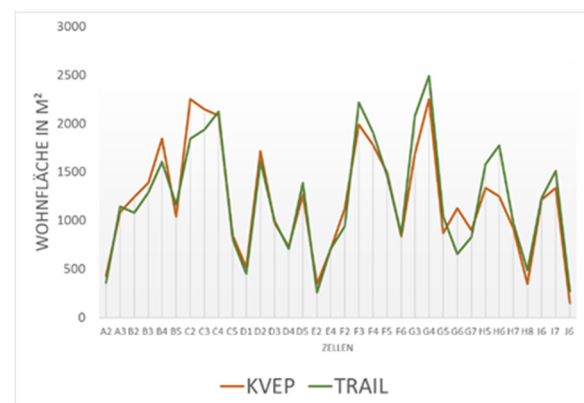


Abbildung 10: Vergleich der Wohnflächen je Zelle

Es zeigt sich, dass bei beiden Verfahren eine hinreichende Übereinstimmung bei der Berechnung der Gesamtwohnfläche innerhalb der Kommune erzielt wurde, die Abweichungen liegen insgesamt bei unter 3 %. Die Abweichungen sind dort am größten, wo ausgebaute Dachgeschosse und ggf. auch ein hoher Anteil an beheizter Kellerfläche vorliegen, da von pauschalen Ansätzen bei der Berechnung des Wohnraumes in Dachräumen ausgegangen wurde.

Festzuhalten ist zudem, dass die Daten aus dem Liegenschaftskataster nicht aktuell sind, teilweise werden hier Gebäude, die tatsächlich zu Wohnzwecken dienen, noch als Nebengebäude dargestellt. Somit wurden teilweise Gebäude bei der Bestandsaufnahme nicht berücksichtigt, die schon Eingang in den Zensus gefunden haben. Anbauten wurden teilweise nicht berücksichtigt, da nicht klar war, ob diese zur beheizten Wohnfläche gehören, insbesondere bei kleineren, eingeschossigen Anbauten.

Zum Vergleich des Wärmebedarfs wurde der Nettoheizwärmebedarf für die komplette Zelle im KVEP berechnet. Die prozentualen Anteile der jeweiligen Baualtersklassen an der Gesamtwohnfläche nach Bestandsanalyse werden innerhalb der Zelle ermittelt. Dieser Prozentsatz wird dazu verwendet, die nach TRAIL bestimmte Wohnfläche innerhalb der Zelle ebenfalls den Baualtersklassen zuzuordnen.

Der spezifische Transmissionswärmeverlust HT' wurde außerdem je Baualtersklasse und Gebäudetyp gemittelt, zum direkten Vergleich zu den bei TRAIL verwendeten Werten aus Tabula. Der Vergleich zu den Wärmebedarfen erfolgt über den Nettoheizwärmebedarf, der jeweils bezogen auf die Wohnfläche und als Gesamtwärmebedarf pro Jahr angegeben wird.

Durch Multiplikation mit dem baualtersklassenbezogenen Nettoheizwärmebedarf aus Tabula wird ein theoretischer Gesamtwärmebedarf in kWh/a berechnet und in Bezug zur Gesamtwohnfläche nach TRAIL ein Wärmebedarf innerhalb einer Zelle ermittelt. Die nachfolgende Übersicht gibt das Verhältnis der Berechnungsergebnisse je Zelle wieder.

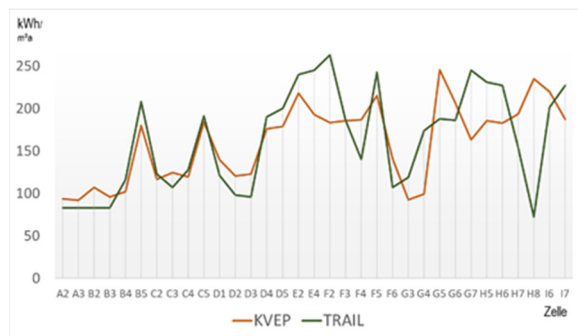


Abbildung 11: Vergleich der Wärmebedarfe je Zelle

Hier ist grundsätzlich die Tendenz erkennbar, dass bei den TRAIL-Werten eine größere Spreizung vorliegt. Dies erklärt sich zunächst daraus, dass im älteren Gebäudebestand bei KVEP gewisse Sanierungsraten unterstellt wurden, die Wärmebedarfe damit insgesamt niedriger bleiben. Im Neubaugebiet beispielsweise (Zellen A2, A3, B2 und B3) weichen die berechneten Werte nach TRAIL-Tool und KVEP nur gering voneinander ab.

In einigen Zellen ist der nach TRAIL berechnete Wärmebedarf jedoch höher. In diesen Zellen handelt es sich überwiegend um Gebäude älterer Baualtersklassen, bei denen im KVEP ein gewisser Sanierungsgrad unterstellt wurde, der jedoch nach den Daten aus der Vor-Ort-Erfassung nicht erkennbar ist.

Dort, wo der Wärmebedarf nach TRAIL zellenbezogen jeweils am höchsten ist, wird angenommen, dass die Einstufung der Gebäude in der Analyse falsch gewählt wurde. In diesen Zellen war die Abschätzung der Baualtersklasse schwierig, insbesondere bei den Baualtersklassen zwischen 1919 und 1949.

ZUSAMMENFASSUNG

Die TRAIL zugrundeliegende Methode ermöglicht es, kleinen Kommunen im ländlichen Raum einen schnellen und kostenlosen ersten Überblick über ihren aktuellen Wärme- und Strombedarf zu geben, ohne aufwendige Bestandsaufnahmen durchführen zu müssen. Damit kommt die Software den Anforderungen der Kommunen entgegen, mit geringen Ressourcen in das Thema Energiewende im ländlichen Raum einzusteigen. Es hilft damit, technische Komplexität zu vereinfachen und Entscheidungsprozesse zu unterstützen.

Erste Vergleiche der TRAIL-Ergebnisse durch Vor-Ort-Begehungen und Berechnungen mit dem Kurzverfahren Energieprofil zeigen nur geringe Abweichungen bei der Ermittlung des Gebäudetyps, der Wohnfläche und des Wärmebedarfs. Diese Ergebnisse werden in die Weiterentwicklung des Tools einbezogen, das ab dem II. Quartal 2020 allen Kommunen in Thüringen frei zur Verfügung steht.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „Transformation im ländlichen Raum 2“, das im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ascione, Fabrizio; Masi, Rosa F. de; Rossi, Filippo de; Fistola, Romano; Sasso, Maurizio; Vanoli, Giuseppe Peter (2013): Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. In: *Cities* 35, S. 270–283.
- Becker, Sören; Naumann, Matthias (2016): Energiekonflikte nutzen. Wie die Energiewende vor Ort gelingen kann. Erkner. Online verfügbar unter <https://energie.wfbb.de>.
- Benedek, Jozsef; Sebestyen, T.; Bartok, Blanka (2018): Evaluation of renewable energy sources in peripheral areas and renewable energy-based rural development 90, S. 516–535.
- Bivand, Roger; Hauke, Jan; Kossowski, Tomasz (2013): Computing the Jacobian in Gaussian spatial autoregressive models. An illustrated comparison of available methods. In: *Geographical Analysis* 45 (2), S. 150–179.
- Bugs, G.; Garnell, C.; Fonts, O.; Huerta, J.; Painho, M. (2010): An assessment of Public Participation GIS and Web 2.0 technologies in urban planning practice in Canela, Brazil. In: *Cities* 27 (3), S. 172–181.

- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2017): Geographische Gitter für Deutschland. GeoGitter. Online verfügbar unter <https://www.geodatenzentrum.de/docpdf/geogitter.pdf>, zuletzt geprüft am 07.01.2019.
- Bundesregierung (2019): Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften. KSG. Online verfügbar unter <http://www.bgbl.de>.
- Byrne, J.; Corgnati, S. P.; Filippi, M. (2008): Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: GIS- and lifecycle cost-based assessment of Western China's options. In: *Energy Policy* 35, S. 4391–4401.
- Cajot, S.; Peter, M.; Bahu, J.-M.; Guignet, F.; Koch, A.; Marechal F. (2017): Obstacles in energy planning at the urban scale. In: *Sustainable Cities and Society* 30 (2210-6707), S. 223–236.
- ECOSPEED AG (2018): ECOSPEED. Climate Software Solutions. Online verfügbar unter <https://www.ecospeed.ch/private/en/>.
- Eurostat regional yearbook. 2019 edition (2019). 2019 edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union (Statistical books, 2019).
- Gröger, Gerhard; Kolbe, Thomas H.; Nagel, Klaus; Häfele, Karl-Heinz (2012): OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-coding Standard (2.0.0). Online verfügbar unter <https://portal.opengeospatial.org/>.
- Hijmans, Robert J. (2017): raster. Geographic Data Analysis and Modeling. Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- HOTMAPS (2018): HOTMAPS Project. Hg. v. HOTMAPS consortium. Online verfügbar unter <http://www.hotmaps-project.eu>.
- Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Kurzverfahren Energieprofil. Online verfügbar unter <https://www.iwu.de/forschung/energie/kurzverfahren-energieprofil/>.
- Kirnats, Lev; Joost, Jan-Niklas; Berg, Sebastian; Frisch, Jérôme; van Treeck, Christoph (2018): Status Quo bei digitalen Werkzeugen und softwarebasierten Lösungsansätzen. In: *Bauphysik* 40 (6), S. 441–448. DOI: 10.1002/bapi.201800031.
- Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus; Stein, Britta; Born, Rolf (2012): Typology Approaches for Non-residential Buildings in Five European Countries - Existing Information, Concepts, and outlooks. Tabula Thematic Report No. 3. Unter Mitarbeit von Intitut Wohnen und Umwelt, Darmstadt - Germany. Typology Approach for Building Stock Energy Assessment.
- OECD (2012): Linking renewable energy to rural development. Paris: OECD publ (OECD green growth studies).
- Pebesma, Edzer (2018a): lwgeom. Bindings to Selected 'liblwgeom' Functions for Simple Features. Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=lwgeom>.
- Pebesma, Edzer (2018b): sf. Simple Features for R. Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=sf>.
- Pfenning, Uwe (2018): Eine soziologische Systemanalyse und sozio-ökonomisches Review der Soziotechnik Energiewende. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 42 (2), S. 151–166.
- Poggi, Francesca; Frimino, Ana; Amado, Miguel (2018): Planning renewable energy in rural areas: Impacts on occupation and land use. In: *Energy and Buildings* 155, S. 630–640.
- Sperling, K.; Hvelplund, F.; Mathiesen, B. V. (2011): Centralisation and decentralisation in strategic municipal energy planning in Denmark. In: *Energy Policy* 39, S. 1338–1351.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hg.) (2011): ZENSUS 2011. Online verfügbar unter <https://www.zensus2011.de>.
- Statistisches Bundesamt (2019): Startseite - Statistisches Bundesamt. Destatis. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de>.
- Team, R. Core (2017): R. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Online verfügbar unter <https://www.R-project.org/>.
- Thüringer Landesamt für Vermessung (2015): Thüringer ALKIS® - Objektartenkatalog. auf Basis der GeoInfoDok Version 6.0.1. Online verfügbar unter <https://www.thueringen.de>.
- Thüringer Landtag (13.03.2014): Thüringer Bauordnung. ThürBO. Fundstelle: GVBl. 2014, 49. Online verfügbar unter <http://www.parldok.thueringen.de>.
- Zanon, B.; Verones, S. (2013): Climate change, urban energy and planning practices: Italian experiences of innovation in land management tools. In: *Land Use Policy* 32, S. 343–355.