

Analyse des PV-Potenzials von Wohngebäuden anhand siedlungsgenetischer Merkmale

Fabian Jetter¹, Stephan Bosch², Tobias Schmid¹

¹Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München · fjetter@ffe.de

²Institut für Geographie, Universität Augsburg

Zusammenfassung: Das Photovoltaik-Potenzial auf den Dächern von Wohngebäuden der Stadt Hamburg wird im Rahmen dieser Studie in Abhängigkeit von siedlungsgenetischen Merkmalen exakt analysiert. Hierzu wird das Solardachkataster von Hamburg nach Dachformen, Gebäude- und Siedlungstypen differenziert ausgewertet, um darauf aufbauend Zusammenhänge zwischen PV-Potenzial sowie Gebäudetyp, Siedlungstyp, Dachform und Gebäudeorientierung herzustellen. Auf Grundlage von Gebäudegrundrissen werden dabei die Gebäude- und Siedlungstypen sowie die Gebäudeorientierung mittels geometrischer und GIS-gestützter Verfahren berechnet. Mit der generierten Datengrundlage sowie zusätzlichen Informationen über den Gebäudebestand einer Region, kann schließlich deren PV-Potenzial bestimmt werden. Dieses Verfahren ist exakter als bisherige Abschätzungen, die ausschließlich auf statistischen Informationen über den Gebäudebestand beruhen.

Schlüsselwörter: Photovoltaik, Solardachkataster, Siedlungstypen, Energiewende

Abstract: This study analyzes the solar potential on roofs of residential buildings in the city of Hamburg as a function of the city's settlement genetic characteristics. Hamburg's solar cadaster is critically evaluated with regard to rooftops, building, and settlement types as well as building orientation. Based on building ground plans, building and settlement types are calculated using geometric and geographic information systems (GIS) based methods. The set of data thus generated, along with further information on a Region's stock of buildings, allows the determination of its PV potential. This method is more accurate than previous estimations based solely on statistical information on the building stock.

Keywords: Photovoltaic, solar roof cadaster, types of settlement, energy transition

1 Ausgangslage, Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Photovoltaik übertrifft Erwartungen

Im Jahr 2014 konnte die Photovoltaik (PV), mit einer Stromerzeugung von 35,2 TWh, etwa 6,9 % des Bruttostromverbrauches decken, wobei die erneuerbaren Energien insgesamt einen Anteil von 31 % erreichten (WIRTH 2015, 5). Die installierte PV-Leistung in Deutschland ist – ausgehend vom Jahr 2005, mit damals noch 2,1 GWp – um den Faktor 18 auf knapp 38,2 GWp zum Jahresende 2014 angestiegen. Dieser große Beitrag der PV zum deutschen Energiemix ist nicht zuletzt deshalb überraschend, da ihre mittelfristige Entwicklungsdynamik von Experten vollkommen anders prognostiziert wurde. NITSCH (2007, 30 ff.) stellte die Behauptung auf, dass der Ausbau von 860 MWp im Jahr 2005 das Maximum der jährlichen Expansionsbemühungen der PV-Branche darstellt und bis 2018 ein Rückgang in der Ausbauaktivität wahrscheinlich ist. Nur ein Jahr später erfuhren diese Annahmen eine drastische Korrektur (NITSCH 2008, 73 ff.), indem zwischen 2008 und 2010 eine Neuinstallation von jährlich 1.200 MW vorausgesagt wurde, die sich in den darauffolgenden Jahren bei einem Wert von 1.000 MWp einpendeln würde. Entgegen dieser Annahmen erhöhte sich die jährliche Neuinstallation jedoch 2007, 2008 und 2009 von 1.270 MWp, über 1.940 MWp bis hin

zu 3.800 MWp. In den Jahren 2010, 2011 und 2012 konnte sogar ein Zubau von 7.400 MWp, 7.500 MWp bzw. 7.600 MWp erzielt werden (BSW 2014, 2). Erst im Jahr 2013 reduzierte sich der Ausbau aufgrund gesetzlicher Anpassungen wieder auf 3.300 MWp, 2014 waren es nur mehr 1.900 MWp (BSW 2015, 1). Folglich weichen die Berechnungen von NITSCH (2007, 2008) erheblich von der tatsächlichen Entwicklung ab. Diese Diskrepanz ist darauf zurückzuführen, dass die Entwicklung der Modulpreise falsch eingeschätzt und durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) eine mehr als ausreichende Förderung gewährleistet wurde. Im Jahr 2006 lag der durchschnittliche Endkundenpreis für Aufdachanlagen noch bei 5.000 €/kWp. Mittlerweile liegen die Netto-Systempreise nur mehr geringfügig über 1.000 €/kWp (PHOTOVOLTAIK-GUIDE 2015).

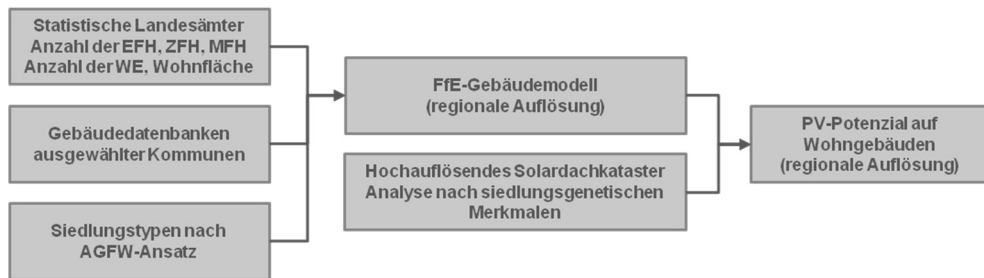


Abb. 1: Modell zur Berechnung des PV-Potenzials auf Wohngebäuden

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Trotz der Kürzungen von Einspeisevergütungen im Rahmen der EEG-Novellierungen ist der Betrieb von PV-Anlagen nach wie vor lukrativ, da weiter fallende Modulpreise sowie die sukzessive Verbesserung von Wirkungsgraden die Konkurrenzfähigkeit dieses Technologiepfades aufrechterhalten (LANGENDÖRFER 2012). Angesichts von Stromgestehungskosten unterhalb des Strompreises für private Haushalte betonen SCHMID et al. (2012a), dass PV-Strom von privaten Hausdächern sogar unabhängig von einer festgelegten Vergütung, allein über den Eigenverbrauch wirtschaftlich darstellbar ist. Um jedoch bewerten zu können, wie sich der zukünftige Ausbau der PV auf Gebäuden sinnvoll entwickeln kann, ist es erforderlich, die potenziell nutzbaren Dachflächen in Deutschland systematisch anhand statistischer Daten und geometrischer Detailanalysen zu ermitteln. Im Blickpunkt des Interesses steht dabei das Gebäudemodell der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), das räumlich differenzierte Aussagen zum Wohngebäudesektor in Deutschland ermöglicht (z. B. Altersstruktur, Gebäudetyp, Energieverbrauchswerte) (SCHMID et al. 2012b). Für ergänzende Detailanalysen erweisen sich Solardachkataster (SDK) als ideale Datengrundlage. Das auf Laserscandaten, Gebäudegrundrissen und Einstrahlungsdaten basierende SDK von Hamburg (HAMBURG ENERGIE GMBH o. J.) wird daher dachflächenscharf anhand unterschiedlicher siedlungsgenetischer Merkmale analysiert, um Zusammenhänge zwischen PV-Potenzial sowie Gebäudetyp, Siedlungstyp, Dachform und Gebäudeorientierung zu identifizieren. Die Ergebnisse der SDK-Analyse werden schließlich auf das FfE-Gebäudemodell übertragen (vgl. Abb. 1). Dies ermöglicht eine bundesweit flächendeckende Berechnung des PV-Potenzials von Wohngebäuden.

1.3 Stand der Forschung

Für das weltweit erste SDK wurden Informationen zur Geometrie der Dachflächen aus photogrammetrischen Daten abgeleitet (WITTMANN et al. 1997). Seit der Verfügbarkeit hochauflösender Fernerkundungsdaten ist es jedoch möglich, ein SDK anhand eines Digitalen Oberflächenmodells (DOM) zu erstellen. Auf dieser Grundlage wurde 2007 das weltweit erste webbasierte SDK berechnet (LANIG & KNOPF 2012). Das DOM enthält wesentliche Informationen zur Neigung und Ausrichtung von Dächern sowie folglich zu Einstrahlungswerten. Es wird aus den LIDAR-Daten (Light detection and ranging) des ALS (Airborne-Laserscanning)-Verfahrens berechnet, bei dem ein Laser im Rumpf eines Flugzeugs oder Helikopters die Oberfläche des Siedlungsgebietes Punkt für Punkt abtastet (KASSNER et al. 2005; VOEGTLE et al. 2005). Es existieren unterschiedliche Ansätze, um das Solarpotenzial auf Dachflächen zu ermitteln (z. B. wie und ob Verschattung durch Dachaufbauten berücksichtigt wird). Dementsprechend unterscheiden sich die Detaillierungsgrade der SDK teils erheblich voneinander (JOCHEM et al. 2009, MITSCHKE & SAMIMI 2008, KAPFENBERGER-POCK 2010). Neben dem ALS-Verfahren und der photogrammetrischen Auswertung stereoskopischer Luftbilder können auch 3D-Stadtmodelle als Basis für Solarpotenzialberechnungen herangezogen werden (BORFECCHIA et al. 2014). Letzteres basiert i. d. R. wiederum auf einem DOM, wobei die Qualität einer solchen Auswertung von der Qualität des 3D-Modells abhängig ist (AGUGIARO et al. 2012). KLÄRLE (2011) weist darauf hin, dass bei der Darstellung der Dachflächen jede Dachgaube, jeder Eigenschatten und jeder Kamin erkennbar sein sollte. Erst bei einer Laserscanaufnahme von mindestens vier Messpunkten pro Quadratmeter ist diese detaillierte Sicht auf das Potenzial der Teilflächen eines Daches möglich. CARR et al. (2012) analysierten ein SDK geringerer Auflösung, indem sie Histogramme von Screenshots aus dem Webviewer des SDK Darmstadt auswerteten. Untersucht wurde dabei nicht das gesamte SDK, sondern mehrere Gebiete, die repräsentativ für bestimmte Siedlungstypen stehen. Die Siedlungstypen wurden dabei nicht berechnet, sondern anhand des visuellen Eindrucks erfasst. Aufgrund der geringeren Auflösung des SDK Darmstadt gegenüber dem des SDK Hamburg, konnten Dachaufbauten, wie Kamine und Leitern sowie Dachflächenfenster, nicht berücksichtigt werden. Um diese Abschlüsse dennoch bestimmen zu können, wurden die Dachflächen unterschiedlicher Gebäudetypen aus Luftbildern abgeleitet. Als Ergebnis liegen die PV-Eignungsflächenanteile nach Siedlungs- und Gebäudtyp vor. Mit den statistischen Informationen des fFE-Gebäudemodells und dem PV-Eignungsflächenanteil nach Siedlungstyp wurde schließlich das PV-Potenzial auf Wohngebäuden berechnet (CARR et al. 2012). Aufgrund der relativ geringen Anzahl untersuchter Gebäude und der geringen Auflösung des SDK Darmstadt sind allgemeingültige Aussagen über gebäude- und siedlungstypische PV-Eignungsflächenanteile jedoch schwierig. Ein SDK mit einem höheren Detaillierungsgrad erstellte MITSCHKE (2008) für den Nürnberger Stadtteil Sankt Leonhard. Die Gebäudetypen wurden dabei manuell erfasst. Die in Karten visualisierten Klassifikationsergebnisse sind über den Vergleich einer von EVERDING (2007) durchgeführten Potenzialstudie zum solaren Städtebau interpretiert. MITSCHKE (2008) verzichtete darauf, PV-Eignungsflächenanteile zu berechnen und in Zahlen auszudrücken. Zudem sind die gewählten Gebäudetypen stark aggregiert. Die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführte Auswertung des SDK Hamburg geht über diese Ansätze hinaus, indem weitere und detailliertere siedlungsgenetische Merkmale berücksichtigt werden. Aufgrund des größeren Untersuchungsgebietes sind zudem mehr Dachflächen Bestandteil der Untersuchung, wodurch sich die statistische Belastbarkeit der Ergebnisse erhöht. Des Weiteren erfolgt die Identifikation von Gebäude- und Siedlungstypen sowie von Gebäudeorientierungen automatisiert.

2 Methodik und Umsetzung

2.1 Datengrundlage und -aufbereitung

Das SDK von Hamburg, das auf Laserscanaufnahmen mit einer Punktdichte von vier Punkten pro Quadratmeter basiert, ist sehr detailliert. Zudem gewährleistet seine große flächenmäßige Ausdehnung eine hohe statistische Belastbarkeit der Ergebnisse. Die im SDK Hamburg enthaltenen Dachflächen sind in vier Eignungsklassen unterteilt. Den Eignungsklassen werden unter Berücksichtigung von Verschattung und optimaler Aufständering (hier 33°) die jährlichen gemittelten Strahlungswerte zugeordnet. Neben den Eignungsklassen sind im SDK auch schwarze Gebäudeumrisse zu erkennen. Diese basieren auf dem Amtlichen Liegenschaftskataster Informationssystem (ALKIS), das eine weitere zentrale Datengrundlage darstellt. Die Gebäudegeometrie und die Eignungsfläche des SDK sind deckungsgleich. Daher kann jedem Gebäude die PV-Eignungsfläche exakt zugeordnet und der Anteil der für PV nutzbaren Fläche nach Eignungsklassen berechnet werden. Allerdings besteht eine Eignungsklasse nicht aus einem einzigen, sondern aus unterschiedlichen Farbtönen. Die Farbe der Rasterzelle setzt sich aus den Werten der drei RGB-Farbbänder zusammen. Da aufgrund der Vielzahl von RGB-Kombinationen eine für die Auswertung notwendige eindeutige Zuordnung der Pixel zu einer Eignungsklasse nicht möglich ist, müssen die Pixelwerte neu berechnet werden. Basierend auf einem eigens entwickelten Verfahren zur Mustererkennung im RGB-Code, werden die Farbwerte der Rasterpixel daher eindeutig den Eignungsklassen zugeordnet (vgl. Abb. 2).

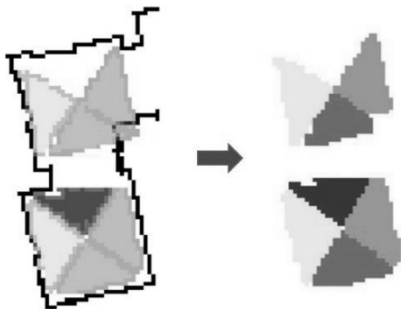


Abb. 2:
Reklassifizierung der Rasterzellen

2.2 Berechnung von Gebäude- und Siedlungstypen

Gebäude- und Siedlungstypen werden anhand räumlicher Analysen und geometrischer Verfahren auf Grundlage der ALKIS-Gebäudegeometrie sowie der Baublockgeometrie des Urban Atlas (EEA 2015) berechnet. Für die Modellierung der Gebäude- und Siedlungstypen werden verschiedene Objekte herangezogen. Diese orientieren sich an den Modellierungsobjekten von HECHT (2014) (vgl. Abb. 3). In einem weiteren Schritt wurden Gebäudekomplexkennwerte, die Aussagen zur Anzahl und zu den Flächenverhältnissen der Gebäude im Gebäudekomplex erlauben, berechnet, um Gebäudetypen eindeutig identifizieren zu können. Für die identifizierten Gebäudetypen ‚Doppelhaus‘ und ‚Reihenhaus‘ konnte dabei eine Übereinstimmung von mindestens 87,3 % bzw. 90 % erreicht werden. Die übrigen Gebäudetypen konnten aufgrund fehlender Validierungsmöglichkeiten nur visuell überprüft werden. Des

Weiteren wurde die Qualität der Gebäudeklassifikation für die SDK-Analyse mithilfe von Attributwerten aus dem ALKIS-Datensatz erhöht. Die flächenmäßige Dominanz eines bzw. mehrerer Gebäudetypen sowie siedlungstypischer Bebauungsdichten innerhalb eines Baublocks bestimmen schließlich den Siedlungstyp.

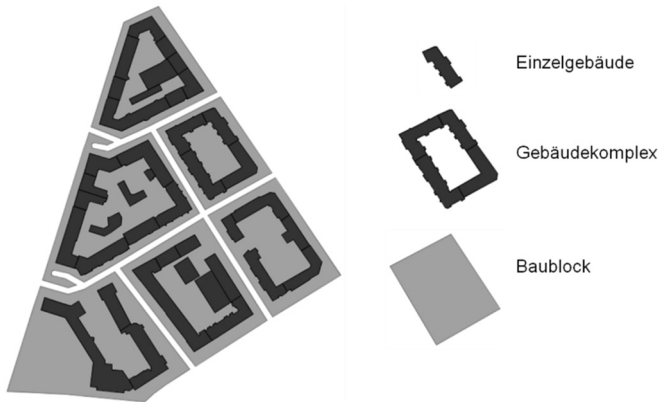


Abb. 3:
Objekte der Modellierung

2.3 Berechnung der Gebäudeorientierung

Die Gebäudeorientierung gibt Aufschluss über die Ausrichtung der Dachflächen zur Sonne.

Es wird die Annahme getroffen, dass der Dachfirst die Gebäudeorientierung bestimmt und immer parallel zu einer Gebäudeseite verläuft. Nach MIOGA (2012) bestimmt die längste Gebäudeseite die Gebäudeorientierung. Dieser Ansatz wird für freistehende Gebäude übernommen, kann allerdings nicht auf Gebäude mit direkt anliegendem Nachbargebäude übertragen werden, da dort der Dachfirst häufig nicht parallel zur längsten Gebäudeseite verläuft. Daher wurde für diesen Fall ein alternatives Verfahren entwickelt. Hierbei werden zunächst die Liniensegmente sowie die vereinigte Fläche der Gebäudepolygone anhand der Gebäudegeometrie berechnet. Letzteres entspricht der Geometrie des Gebäudekomplexes (vgl. Abb. 3). Die Geometrie des Gebäudekomplexes wird anschließend negativ gepuffert (vgl. Abb. 4). Im Anschluss werden diejenigen Liniensegmente aussortiert, die sich mit der negativ gepufferten Gebäudekomplexgeometrie schneiden, sodass die Gebäudeliniensegmente ohne Gebäudetrennwände übrig bleiben. Nun wird der von MIOGA (2012) verwendete Ansatz wieder aufgegriffen. Allerdings bestimmt nun die zweitlängste Seite die Gebäudeorientierung, um zu gewährleisten, dass bei den äußeren Gebäuden eines Gebäudekomplexes die Front-, und nicht die Randseite als längste Seite identifiziert wird. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zu Grunde, dass bei mittleren Gebäuden eines Gebäudekomplexes ohne Gebäudetrennwand, die zweitlängste Gebäudeseite parallel zur längsten Gebäudeseite verläuft (beide Seiten können auch gleichlang sein). In Abbildung 4 sind die Gebäudeseiten, die die Orientierung bestimmen, gestrichelt dargestellt.

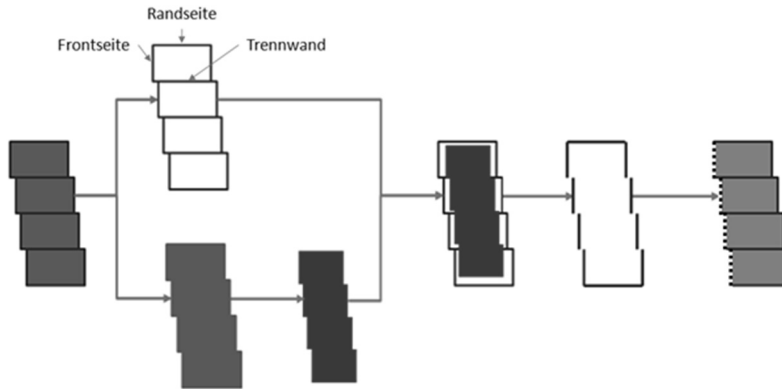


Abb. 4: Berechnung der Gebäudeorientierung

2.4 Auswertung des Solardachkatasters

Die Ergebnisse der oben erläuterten Berechnungen bezüglich Gebäudetyp, Siedlungstyp und Gebäudeorientierung, die Informationen aus dem ALKIS-Datensatz über die Dachform sowie das über das SDK Hamburg ableitbare PV-Potenzial werden in einem weiteren Schritt für jede Dachfläche mit solarer Eignung zu einem Datensatz zusammengefasst (vgl. Abb. 5). Die Auswertung dieses Datensatzes gibt Aufschluss über die Zusammenhänge zwischen PV-Potenzial und den einzelnen siedlungsgenetischen Merkmalen. Die Mittelwerte der nutzbaren Dachfläche nach Gebäudetyp und Eignungsklasse in Abbildung 6 zeigen, dass bei ‚Einfamilienhäusern‘ und ‚Doppelhäusern‘ sowohl der Anteil der gesamten nutzbaren Dachfläche, als auch der Anteil der einzelnen Eignungsklassen an der gesamten Dachfläche sehr ähnlich ist. Ebenso weisen ‚Reihenhäuser‘ und ‚Mehrfamilienhäuser in Zeilenbebauung‘ sowie ‚große freistehende Mehrfamilienhäuser‘ und ‚Mehrfamilienhäuser in Blockbebauung‘ vergleichbare Werte auf. Größere Abweichungen bestehen zwischen ‚kleinen freistehenden Mehrfamilienhäusern‘ und ‚großen freistehenden Mehrfamilienhäusern‘. Dies bestätigt die Entscheidung, ‚kleine und große freistehende Mehrfamilienhäuser‘ jeweils separaten Gebäudetypen zuzuordnen. Die Auswertung der Anteile der unterschiedlichen Dachformen an den Gebäudetypen sowie eine Analyse der nutzbaren Dachfläche nach Dachform und Eignungsklasse bestätigt zudem, dass die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Gebäudetypen bezüglich ihres für die Solarenergie nutzbaren Dachflächenanteils maßgeblich von der Dachform abhängt. Betrachtet man den Anteil der unterschiedlichen Dachformen an den jeweiligen Gebäudetypen, so können auch hier Paare von Gebäudetypen identifiziert werden, die eine ähnliche Verteilung von Dachformen aufweisen. Diese Gebäudetypenpaare sind in unterschiedlicher Ausprägung deckungsgleich mit den oben genannten. So lassen sich die vergleichbaren Eignungsflächenanteile von ‚großen freistehenden Mehrfamilienhäusern‘ und ‚Mehrfamilienhäuser in Blockbebauung‘ dadurch erklären, dass ‚Mehrfamilienhäuser in Blockbebauung‘ einen hohen Anteil an Mansardendächern und ‚große freistehende Mehrfamilienhäuser‘ einen hohen Anteil an Flachdächern aufweisen. Beide Dachformen besitzen einen hohen bzw. sehr hohen Anteil an sehr gut geeigneter Dachfläche für PV. Der insgesamt

hohe Anteil an Flachdächern mit fast ausschließlich sehr guter Eignung bei ‚großen freistehenden Mehrfamilienhäusern‘ wird durch den gegenüber ‚Mehrfamilienhäusern in Blockbebauung‘ höheren Anteil an Mansardendächern relativiert. Diese Dachform weist nur geringe Eignungsflächenanteile auf.



Abb. 5: PV-Eignungsfläche nach Gebäude- und Siedlungstyp

Mit den Parametern Dachfläche und den in dieser Arbeit berechneten PV-Eignungsflächenanteilen wird in einem letzten Schritt das PV-Potenzial ermittelt. Da im ALKIS keine Informationen bezüglich der Dachneigung enthalten sind, müssen für die Berechnung des PV-Potenzials dachformspezifische und gebäudetypische Dachneigungen aus der SDK-Analyse abgeleitet werden. Die Auswertung von Luftbildern zeigt, dass Mansardendächer gerade bei

dem Gebäudetyp ‚Mehrfamilienhäuser in Blockbebauung‘ zu einem großen Teil nahezu ebene Dachflächen aufweisen. Daraus resultiert, dass Mansardendächern auf ‚Mehrfamilienhäuser in Blockbebauung‘ eine geringere Dachneigung zugeordnet wird, um deren Flächenpotenzial nicht zu überschätzen. In diesem Fall müssen aufgrund von Reihenabständen der aufgeständerten Module – wie auch bei Flachdächern – Flächenabschläge berücksichtigt werden. Um den hohen Eignungsflächenanteil von ‚Reihenhäusern‘ gegenüber ‚Einfamilienhäusern‘ und ‚Doppelhäusern‘ zu erklären, wird der erstellte Datensatz bezüglich der nutzbaren Dachfläche für Flachdächer ausgewertet. Im Vergleich zu Steildächern sind Flachdächer orientierungsunabhängig. Für die Untersuchung des Einflusses der Verschattung auf die Dachflächeneignung sind Flachdächer daher besonders geeignet. Das Ergebnis dieser Auswertung offenbart, dass die Gebäudetypen ‚Einfamilienhaus‘ und ‚Doppelhaus‘ im Gegensatz zum ‚Reihenhaus‘ – trotz vergleichbarer Gebäudehöhen und vergleichbarer Abschläge durch Gebäudeaufbauten – einen geringeren PV-Eignungsflächenanteil besitzen. Dies ist dadurch zu erklären, dass ‚Reihenhäuser‘ gegenüber ‚Einfamilienhäusern‘ und ‚Doppelhäusern‘ weniger durch Vegetation verschattet werden, was wiederum auf die geringe Grundstücksgröße bei ‚Reihenhäusern‘ mit entsprechend geringerem Baumbestand zurückzuführen ist. Diese Auswertungsbeispiele zeigen, dass wesentliche Zusammenhänge zwischen der für PV nutzbaren Dachfläche sowie dem Gebäudetyp, dem Siedlungstyp und der Dachform bestehen. Der erstellte Datensatz ermöglicht es nicht zuletzt, für jeden Gebäudetyp die mittleren siedlungstypischen und dachformspezifischen Eignungsflächenanteile entsprechend der Gebäudeorientierung zu berechnen.

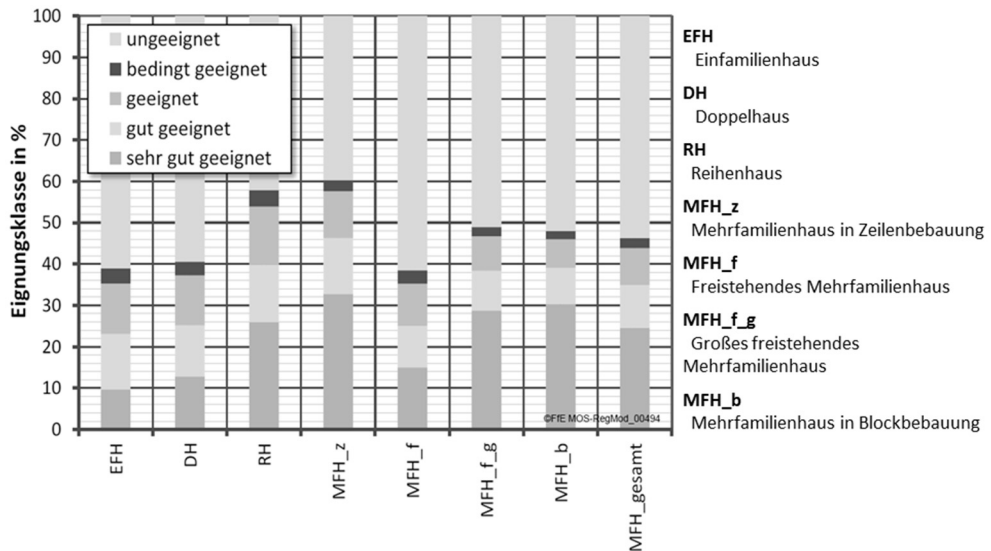


Abb. 6: Anteil der nutzbaren Dachfläche nach Gebäudetyp und Eignungsklasse

3 Kompatibilität

Um die Kompatibilität der dachflächenscharfen Auswertung des SDK mit dem FfE-Gebäudemodell zu überprüfen, wird die in dieser Arbeit angewandte Gebäudetypologie mit den berechneten gebäude-, siedlungs- und dachformspezifischen PV-Eignungsflächenanteilen in das FfE-Gebäudemodell implementiert. Für Hamburg ergibt sich bei einer typischen Annahme von 0,14-0,15 kWp/ m² (LÖDL et al. 2010, StMWVIT 2010) und einer für PV nutzbaren Dachfläche von etwa 12 km² eine potenzielle installierte Leistung von 1,72 GWp. Das Ergebnis der Auswertung wird mit dem aus dem SDK Hamburg berechneten PV-Potenzial validiert. Die Auswertung des SDK von Hamburg ergibt ein Kollektorflächenpotenzial von 11,79 km². Dies entspricht einer installierten Leistung von 1,68 GWp. Die Abweichung der beiden berechneten PV-Potenziale beträgt damit lediglich 2,3 %. Die Vereinbarkeit des FfE-Gebäudemodells mit den in dieser Arbeit berechneten gebäude- und siedlungstypischen sowie dachformspezifischen PV-Eignungsflächenanteilen wurde somit verifiziert. Diese große Übereinstimmung ist ein Indikator dafür, dass die PV-Eignungsflächenanteile korrekt berechnet wurden und die Anpassung der verwendeten Gebäudetypen an die Gebäudetypologie des FfE-Gebäudemodells stimmig ist. Eine Übertragung der Methodik auf weitere Städte erscheint daher angebracht.

Literatur

- AGUGIARO, G., NEX, F., REMONDINO, F., DE FILIPPI, R., DROGHETTI, S. & FURLANELLO, C. (2012), Solar Radiation estimation on building roofs and web-based solar cadaster. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, I-2, XXII ISPRS Congress*, 25. August – 01. September 2012, Melbourne.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (StMWVIT) (2010), Bayerischer Solaratlas – Solare Energiegewinnung, München.
- BORFECCHIA, F., CAIAFFA, E., POLLINO, M., DE CECCO, L., MARTINI, S., LA PORTA, L. & MARUCCI, A. (2014), Remote Sensing and GIS in planning photovoltaic potential of urban areas. *European Journal of Remote Sensing*, 47, 195-216.
- BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT (BSW) (2014), Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), Berlin.
- BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT (2015), Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), Berlin.
- CARR, L., VON ROON, S., SCHMID, T. & STEINERT, C. (2012), Regionale Leistungspotentialabschätzung Erneuerbare Energien, München.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) (2015), Urban Atlas. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas> (14.08.2015).
- EVERDING, D., WACHTEN, K. & WIESER, W. (2007), Solarer Städtebau – Vom Pilotprojekt zum Planerischen Leitbild, Stuttgart.
- HAMBURG ENERGIE GMBH (o. J.), Der Hamburger Solaratlas – Wie viel Sonne scheint auf ihr Dach? <http://www.hamburgenergie.de/privatkunden> (11.08.2015).
- HECHT, R. (2014), Automatische Klassifizierung von Gebäudegrundrissen – Ein Beitrag zur kleinräumigen Beschreibung der Siedlungsstruktur. *IÖR Schriften*, 63. Dresden.

- JOCHEM, A., HÖFLE, B., HOLLAUS, M. & RUTZINGER, M. (2009), Object detection in airborne LIDAR data for improved solar radiation modeling in urban areas. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 1-6.
- KAPFENBERGER-POCK, A. (2010), Grazer Solardachkataster – GIS-gestützte Standortanalyse für Solaranlagen. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.), *Angewandte Geoinformatik 2010 – Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg*. Wichmann, Berlin/Offenbach, 504-513.
- KASSNER, R., KOPFER, W., SCHÜTTENBERG, T. & BARETH, G. (2008), Analysis of the solar potential of roofs by using official LIDAR data. *Proceedings of the International Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Hannover.
- KLÄRLE, M. (2011), Ein Solarkataster mit Sun Area. *Erneuerbare Energien – Das Magazin*. <http://www.erneuerbareenergien.de/ein-solarkataster-mit-sun-area/150/480/31543/> (12.08.2015).
- LANGENDÖRFER, U. (2012), Potentialanalyse Solar. In: KLÄRLE, M. (Hrsg.), *Erneuerbare Energien unterstützt durch GIS und Landmanagement*. Wichmann, Berlin/Offenbach, 271-281.
- LANIG, S. & KNOPF, M. (2012), Web-GIS-gestützte Informationen für Bürger, Kommunen, Wirtschaft und Energieversorger. In: KLÄRLE, M. (Hrsg.), *Erneuerbare Energien unterstützt durch GIS und Landmanagement*. Wichmann, Berlin/Offenbach, 326-333.
- LÖDL, M., KERBER, G., METZGER, M., HOFFMANN, C. & WITZMANN, R. (2010), Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland. 11. Symposium Energieinnovation, Graz.
- MIOGA, K. (2012), Diskussion und Modellierung siedlungstypspezifischer PV-Ausbauszenarien und Topologien des Niederspannungsnetzes. München.
- MITSCHE, C. (2008), Die Eignung von Dachflächen für Solaranlagen zur dezentralen Energieversorgung einer Großstadt am Beispiel von Nürnberg, Erlangen.
- MITSCHE, C. & SAMIMI, C. (2008), GIS-basierter Ansatz zur Erkennung geeigneter Dachflächen für Solarenergienutzung im Stadtteil St. Leonhard in Nürnberg. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.), *Angewandte Geoinformatik 2010*. Wichmann, Berlin/Offenbach, 482-490.
- NITSCH, J. (2007), *Leitstudie 2007 – Ausbaustrategie Erneuerbare Energien*. Stuttgart.
- NITSCH, J. (2008), *Leitstudie 2008 – Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Energien vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas*. Stuttgart.
- PHOTOVOLTAIK-GUIDE (2015), PV-Preisindex. <http://www.photovoltaik-guide.de/pv-preisindex>, (13.08.2015).
- SCHMID, T., CORRADINI, R., BEER, M., ELLER, S. & CARR, L. (2012a), *Masterplan: Optimierte Energieversorgung – Projekt im Verbund „Eneff:Stadt – Chancen und Risiken von KWK im politischen Umfeld“*. München.
- SCHMID, T., BEER, M. & CORRADINI, R. (2012b), *Energiemodell der Wohngebäude*. *BWK – Das Energie-Fachmagazin*, 64 (1/2), 48-53.
- VOEGTLE, T., STEINLE, E. & TÓVÁRI, D. (2005), Airborne laserscanning data for determination of suitable areas for photovoltaics. Workshop „Laser scanning 2005“. Enschede, the Netherlands, September, 12-14.
- WIRTH, H. (2015), *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg.
- WITTMANN, H., BAJONS, P., DONEUS, H. & FRIESINGER, H. (1997), Identification of roof areas suited for solar energy conversion systems. *Renewable Energy*, 11 (1), 25-36.