

Städtische Solarpotenzial-Karten im Vergleich

Joseph Bergner (HTW Berlin), Bernhard Siegel (HTW-Berlin), Kai Mainzer (KIT),
Russell McKenna (KIT)

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

Fraunhofer Karlsruher Institut für Technologie KIT

Tel.: 030/5019-3634

E-Mail: pv2city-info@htw-berlin.de

Internet: <http://pvspeicher.htw-berlin.de>

1. Einleitung

Vielerorts ist Klimaschutz auf kommunaler Ebene angekommen: Neben Energie- und CO₂-Einsparungen wird dabei auch oft der Aufbau von erneuerbaren Erzeugungskapazitäten angestrebt. Für realistische Ziele ist das Wissen um die Potenziale essentiell. Hierbei helfen Potenzialkarten, die Potenzialflächen der Region graphisch darzustellen und zu analysieren. Für die solare Potenzialabschätzung gibt es unterschiedliche Verfahren.

In diesem Beitrag werden für Berlin zwei durch verschiedene Methoden erstellte Potenzialkarten miteinander verglichen. Ziel ist es die dabei, zu evaluieren ob beide Methoden zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen. Somit ließen sich Solarpotenzialkarten kostengünstig erstellen, erweitern und aktualisieren. Berlin als Untersuchungsgebiet umfasst etwa 530.000 Gebäude mit 3,5 Mio Einwohnenden. Die Metropole weist sehr unterschiedliche städtebauliche Gebiete auf. Neben den Gründerzeitbauten, die vor allem die Innenstadtbezirke prägen, ist die Plattenbauarchitektur prägend für den Ostteil der Stadt. Zahlreiche Einfamilien- und Reihenhaussiedlungen sind an den Ausläufern der Stadt zu finden. Diese bauliche Vielfalt macht die Stadt zu einem guten Untersuchungsgegenstand.

Vorerst wird hierfür die Datengrundlage der Untersuchung und die zugrundeliegende Methodik zur Erstellung der Potenzialkarten beschrieben. In der vergleichenden Auswertung werden Dachausrichtung und Neigung, Anteil der Flachdächer, Potenziale in den einzelnen Baunutzungsklassen und die Unterschiede in den Berliner Bezirken dargestellt.

2. Datengrundlage

Für Berlin liegen zwei Solarpotenzialkarten vor. Einerseits steht mit dem Solaratlas ein dreidimensionales Gelände- und Gebäudemodell auf Basis von Laserscandaten zur Verfügung [1]. Hierfür wird ein Stadtgebiet überflogen und mit sogenannten LiDAR-Radarsystemen vermessen. Aus dem dreidimensionalen Stadtmodell werden dann die Dachflächen errechnet. Mit Kenntnis des Sonnenstandes, lassen sich Hindernisse die einen Schatten auf das Dach werfen könnten, wie Bäume oder andere Gebäude, ausgewertet, so dass sich ein detailliertes Bild zur Verschattung einzelner Dachflächen abzeichnet.

Die Methode zur Erstellung überzeugt durch seine hohe räumliche Auflösung von mehreren Messpunkten pro Quadratmeter und ist in der Fläche beliebig skalierbar. Allein in Deutschland kam sie bereits in über 800 Kommunen zur Anwendung [2]. Der Nachteil besteht in der notwendigen Überfliegung des Gebiets, welches zum einen mit hohen Kosten- und zum anderen mit Zeitaufwand verbunden ist. Daher müssen Neubauten und Ersatzneubauten im Solaratlas vorerst unberücksichtigt

bleiben. Für die Erstellung wurde eine Verschattungssimulation der Gebäudedächer durchgeführt und die Dächer entsprechend ihrer Jahreserträge bewertet.

Als Alternative kommt die am KIT entwickelte Software RE³ASON zum Einsatz [3], [4]. Sie setzt auf frei verfügbare Satellitendaten und digitale Karten (Bingmaps, OpenStreetMap u.a.). Mit Hilfe digitaler Bilderkennung werden die zweidimensionalen Teildachflächen der Gebäude erkannt und deren Ausrichtungen bestimmt. Neben dem Flächenpotenzial kann mit der Software das technische Potenzial eines Kartenausschnitts bestimmt und ökonomisch bewertet werden. Das Verfahren ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Zuerst wird aus den OpenStreetMap-Daten der Gebäudegrundriss und die Ausrichtung des Gebäudes erkannt (a) und deren Grundfläche bestimmt (b). Aus Satellitenaufnahmen wird der First erkannt (siehe Abbildung 2) oder gegebenenfalls ein Flachdach angenommen (c). Mit einer statistischen Verteilung der Dachneigung ergibt sich eine Dachfläche (d), die durch Dachaufbauten wie Gauben oder Schornsteine, die ebenfalls aus den Satellitenaufnahmen entnommen werden, reduziert wird (e). Abschließend erfolgt eine Modulbelegung der verbleibenden Flächen (f), welche das Dachflächenpotenzial auf ein technisches Potenzial reduziert.

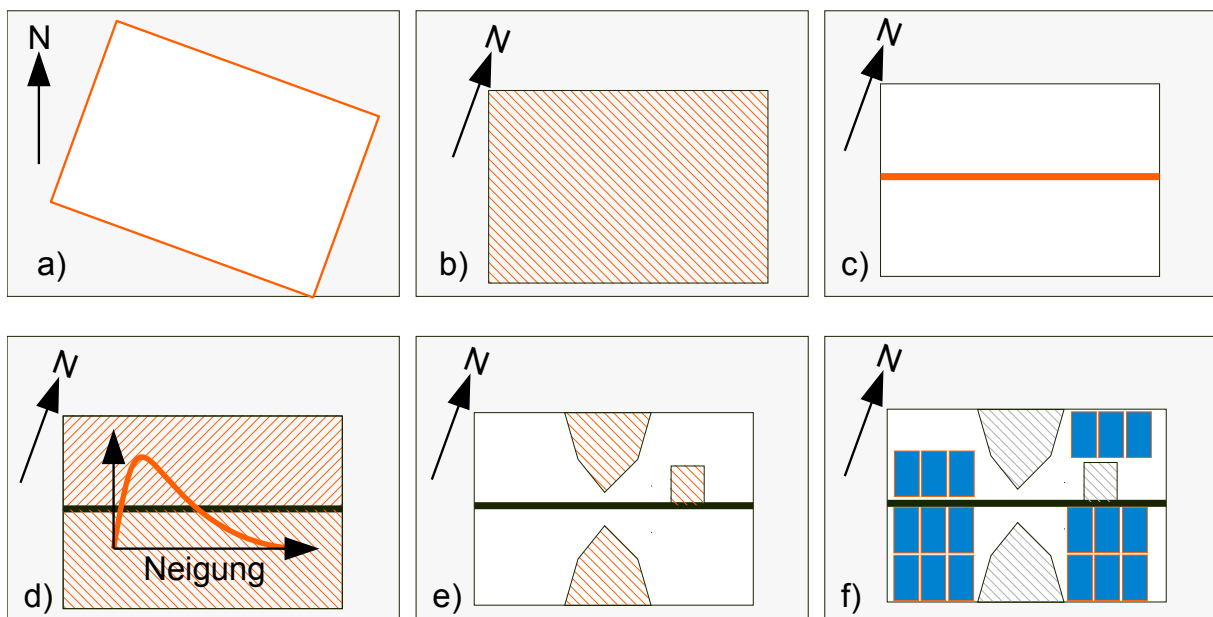


Abbildung 1 Schematische Darstellung der zugrundeliegenden Methodik des RE³ASON-Modells.

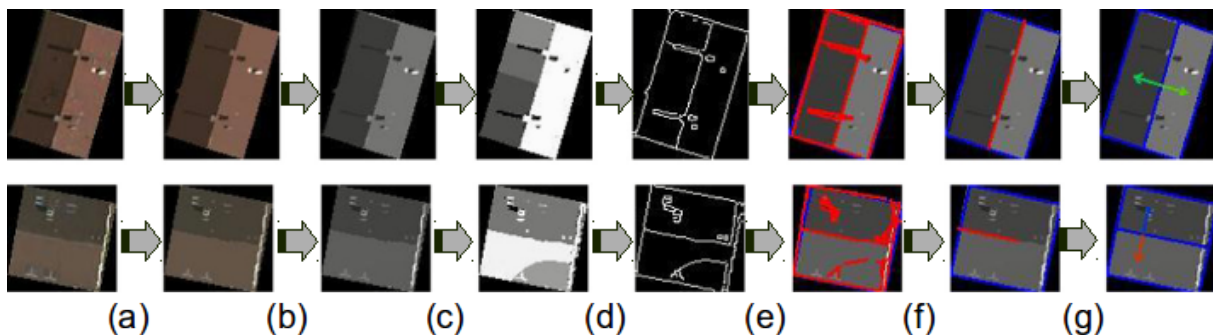


Abbildung 2 Prozessschritte zur Dachfirsterkennung aus Satellitenaufnahmen für zwei Gebäude. (a) Rauschunterdrückung, (b) Farbfilter, (c) Histogrammäqualisation, (d) Canny edge detection zur Erkennung von Kanten, (e) Hough-Transformation für die Erkennung von geraden Linien, (f) logischer Filter zur Unterscheidung der Linien und Erkennung des First, (g) Berechnung der Ausrichtung. Darstellung aus [3].

Das Verfahren unterscheidet sich hinsichtlich der Aussagekraft für einzelne Gebäude vom Solaratlas, da z.B. stochastische Annahmen über die Verteilung von Dachneigungen getroffen werden müssen. Es bietet jedoch die Möglichkeit zur Berücksichtigung von aktualisierten Datenquellen, sodass zum Beispiel Neubauten ohne größere Kosten integriert werden können.

Weitere Vorteile liefert RE³ASON im Hinblick auf Modelleinschränkungen, so werden im Solaratlas bereits verschiedene Gebäude herausgefiltert und bleiben daher unberücksichtigt. Grundlegende Annahmen für den Solaratlas sind:

- (1) ein Modulwirkungsgrad von 15%,
- (2) eine Mindestgröße der PV-Anlage von 2 kW bzw. 15 m² für Schräg- und 40 m² für Flachdächer bei einer Flächennutzung von 40 %,
- (3) die Reduzierung der Direktstrahlung durch Verschattung muss unterhalb von 10% liegen,
- (4) Flächen mit einem Ertrag von weniger als 80 % des maximalen Ertrages werden kategorisch ausgeschlossen.

Vor dem Hintergrund steigender Wirkungsgrade, gesunkener Modulkosten und einer alternativen Flachdachbelegung, müssen einige Annahmen heute kritisch bewertet werden. Zusätzlich enthält der Solaratlas auch die für Solarthermie geeigneten Flächen, für die weniger restriktive Annahmen getroffen wurden:

- (1) die Mindestgröße der nutzbaren Dachfläche beträgt 5 m² für Schräg- und 15 m² für Flachdächer,
- (2) Flächen mit einem Ertrag von weniger als 80 % des maximalen Ertrages werden kategorisch ausgeschlossen.

Somit ist ein zentraler Unterschied der beiden Karten der Ausschluss von wenig verschatteten Flächen im Solaratlas. Von den geeigneten Potenzialflächen des Solaratlases haben Flachdächer einen Flächenanteil von etwa 60 %, was den Erfahrungen in [5], [6] entspricht. Dieser dient als Eingangsgröße für das RE³ASON-Modell. Die Modellannahmen für die Simulation mit RE³ASON sind wie folgt beschrieben:

- (1) Ein Flachdachanteil von 60 % aus [1],
- (2) ein Modulwirkungsgrad von 15% angenommen,
- (3) die Mindestgröße der Dachfläche beträgt 15 m² oder 1 kW installierbarer Leistung,

Für einen systematischen Vergleich werden beide Karten auf eine einheitliche Datenbasis hinsichtlich der Annahmen gebracht und anschließend miteinander verglichen.

Dies betrifft zum einen die Mindestgröße von zu betrachtenden Dachflächen sowie die Mindesteinstrahlung. RE³ASON wäre im Gegensatz zur pauschalen Wirkungsgradannahme des Solaratlases in der Lage das physikalische Verhalten in Abhängigkeit von Auslastungsgrad, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit detailliert nachzubilden [3]. Für die bessere Vergleichbarkeit wurde in diesem Beitrag darauf verzichtet.

Zusätzlich zu den Potenzialkarten werden in diesem Beitrag auch die Baunutzungs-klassen des jeweiligen statistischen Blocks für die Auswertung herangezogen (Daten: [7]). Für die Übersichtlichkeit wurden diese in Abbildung 3 in drei Kategorien zusammengefasst. Die geographische Zuordnung eines Blockes orientiert sich an den lebensweltlich orientierten Räumen. Sie umfasst meist nicht mehr als ein von wenigen Straßenzügen eingefasstes Gebiet. Die Daten sind zusätzlich nach den Berliner Verwaltungsbezirken (Mitte, Neukölln, etc.) sortiert und werden in diesen Kategorien ausgewertet.

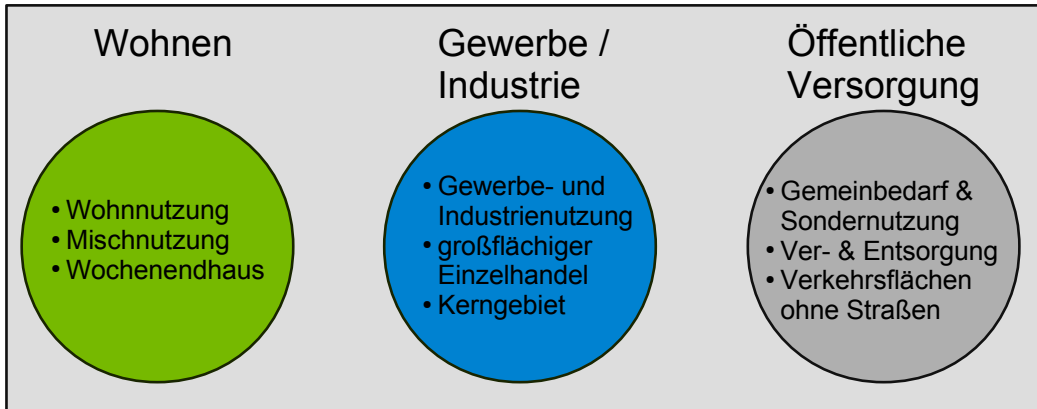


Abbildung 3 Zusammenfassung der Baunutzung nach [7].

3. Ergebnisse

Insgesamt werden mit RE³ASON etwa 640.000 Dachflächen kartiert, wovon 213.000 den Kriterien des Solaratlasses genügen. Im Solaratlas werden 383.000 bzw. 870.000 Teildachflächen für PV bzw. Solarthermie erfasst. Fasst man diese pro Gebäude zusammen, ergeben sich etwa 250.000 bzw. 580.000 Dachflächen unterschiedlicher Ausrichtung und Neigung. Insbesondere komplexe Dachformen werden durch die Bilderkennung vereinfacht dargestellt. Die jeweiligen Gesamtpotenziale sind in Abbildung 4 dargestellt. Das zunächst sehr hohe Dachflächen-Potenzial des RE³ASON-Modells (grün) wird weniger durch den Ausschluss kleiner Flächen (blau) sondern insbesondere durch das Kriterium der Mindesteinstrahlung stark eingeschränkt (grau).

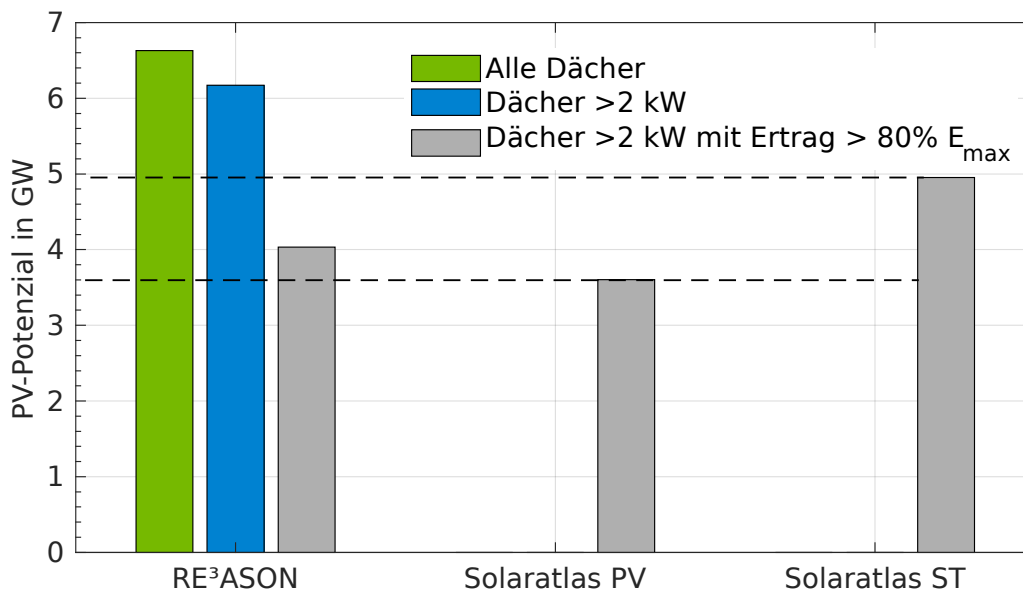


Abbildung 4: Vergleich der Solarpotenzialflächen Berlins bei einem Wirkungsgrad von 15%.

Dies entspricht der Erfahrung, dass schlecht ausgerichtete Flächen nur selten erschlossen werden. Die ausgeschlossenen Flächen machen zwar knapp 60 % der potenziellen Leistung aus, jedoch weniger als 33 % der solaren Energie. Ist diese Einschränkung bei einer Maximierung des Ertrags gerechtfertigt, ergibt sie vor dem Hintergrund sinkender Systemkosten und den gestiegenen Anforderungen zur Systemintegration immer weniger Sinn. Dennoch zeigt es, wie stark die systemischen Annahmen das prognostizierte Potenzial beeinflussen.

Verglichen mit dem PV-Potenzialflächen des Solaratlas (Solaratlas PV) zeigen sich dennoch Unterschiede von 11 %. Dies entspricht etwa 80 % der für Solarthermie als geeignet ausgewiesenen Flächen (Solaratlas ST). Somit liegt das ermittelte solare Flächenpotenzial der Bilderkennung zwischen den Ergebnissen der 3D-Simulation des Solaratlases.

3.1 Ausrichtung und Neigung

Es zeigt sich, dass mit Hilfe von RE³ASON zuverlässig Gebäudestrukturen erkannt werden. Dies drückt sich vor allem in der Darstellung der Gebäude-Ausrichtungen aus (Abbildung 5). Nach der Reduktion der Potenzialflächen auf die dem Solaratlas ähnlichen Kriterien stimmen die Ausrichtungen der Dachflächen insgesamt überein. Unterschiede lassen sich zum einen dadurch erklären, dass die Flachdächer des Solaratlases keine Ausrichtung haben. Zum anderen weist RE³ASON nach Anwendung der Filter etwa 40.000 bzw. 20 % weniger Flächen aus, da die Teilflächen stärker zusammengefasst und weniger detailliert aufgeschlüsselt werden.

Systematische Unterschiede beider Potenzialkarten werden bei der Betrachtung der Verteilung der Dachneigungen deutlich (Abbildung 6). Die Neigung der Dachfläche kann bei zweidimensionalen Luftbildern nicht erfasst werden. Daher wird hierfür in RE³ASON ein stochastischer Ansatz auf Basis der Neigungsverteilung von Dachflächen gewählt. Es ergibt sich eine homogene Verteilung der Dachneigungen. Als Datenbasis dieser Verteilung dienen die Dächer in Baden-Württemberg, welches im Gegensatz zu Berlin ländlicher geprägt ist und deutlich weniger Flachdächer aufweist. Die Verteilung der Neigungen des Solaratlases zeigen hingegen einen Verlauf mit zwei Maxima. Dies schlägt sich auch in den Potenzialflächen der Gebäude nieder, daher ist ein Vergleich auf Ebene einzelner Gebäude nicht sinnvoll.

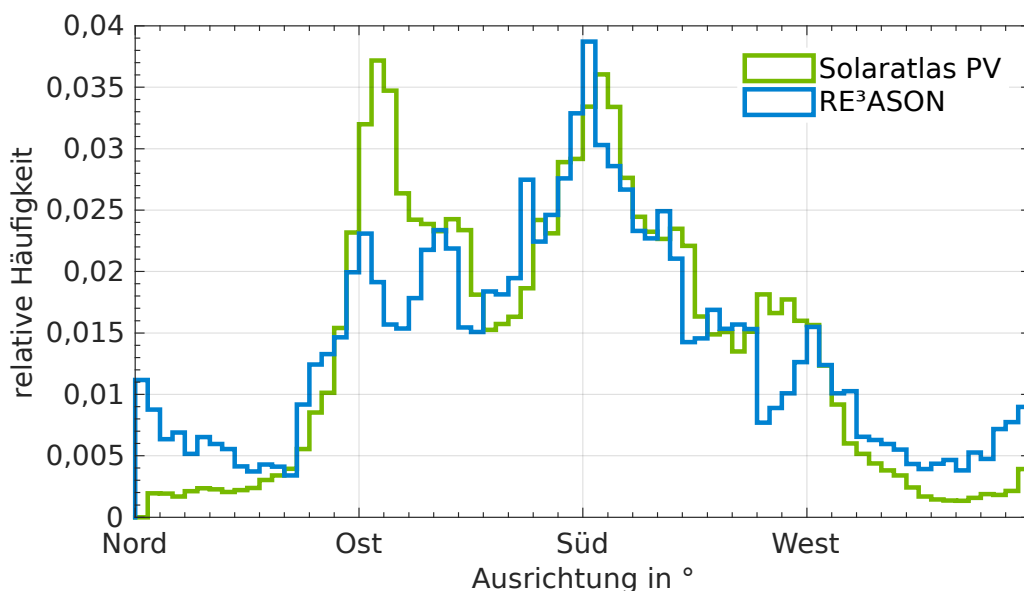


Abbildung 5: Ausrichtungen der Gebäude nach RE³ASON und Solaratlas (ohne Flachdächer), (RE³ASON-Filter: Dächer größer 15m² Ertrag ist 80% des maximalen Ertrags in Berlin).

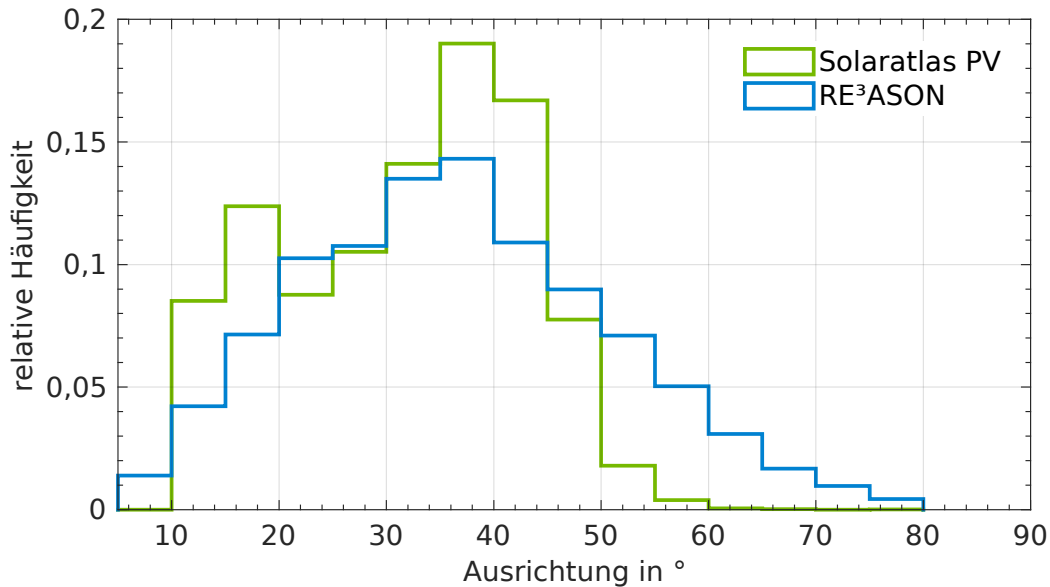


Abbildung 6: Dachneigung der Gebäude nach RE³ASON und Solaratlas ohne Flachdächer (RE³ASON-Filter: Dächer größer 15m² Ertrag ist 80% des maximalen Ertrags in Berlin).

In der Gesamtbetrachtung fällt die Diskrepanz zwischen Flach- und Schrägdächern auf (vgl. Abbildung 7). Die Datengrundlage entspricht den grauen Balken in Abbildung 4. Die Erkennung eines Flachdachs aus Luftbildern ist schwierig, weswegen in RE³ASON der Anteil der Flachdächer im Untersuchungsgebiet einer von vielen Parametern ist, die den Algorithmus beeinflussen. Diese Problematik ergibt sich für den Solaratlas nicht. Der Anteil der Flachdächer am gesamten Solarpotenzial ist hier etwas geringer. Ursächlich hierfür ist, dass in RE²ASON ein konkreter Belegungsplan mit PV-Modulen erstellt wird, während der Solaratlas einen pauschalen Wert von 40 % der Dachfläche als PV-Fläche ermittelt. Es ist anzumerken, dass beide Potenzialarten von einer Aufständering der PV-Anlagen nach Süden ausgehen, was auf Grund von Reihenabständen zu einer nicht optimalen Flächenausnutzung führt, jedoch zu den geringsten Stromgestehungskosten.

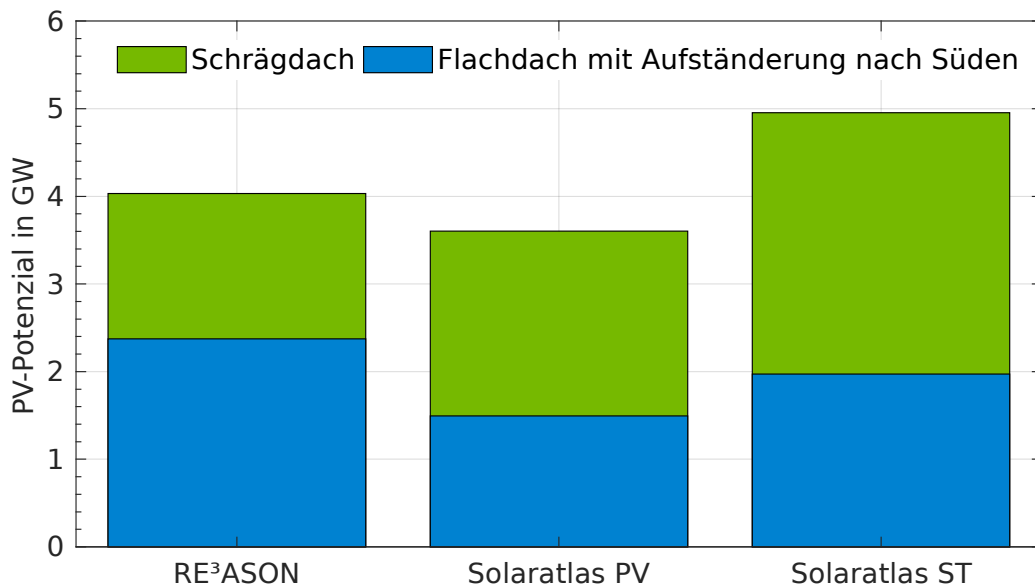


Abbildung 7: Vergleich der Solarpotenzialflächen Berlins von Schrägdach (grün) und Flachdach mit Aufständering bei einem Wirkungsgrad von 15%. (RE³ASON-Filter: Dächer größer 15m² Ertrag ist 80% des maximalen Ertrags in Berlin).

So könnte der flächenbezogene Ertrag deutlich größer sein, wenn eine Ost-West-Belegung des Daches gewählt wird. Mit sinkenden Modulkosten könnte dies einen ökonomischen Vorteil darstellen, so dass das Potenzial der Flachdächer auch deutlich höher sein kann. Weitere Vorteile ergeben sich sowohl auf lokaler Ebene durch die höhere Korrelation mit dem lokalen Verbrauch. Darüber hinaus konnten Vorteile einer von Süden abweichenden Ausrichtung auch auf Bundesebene nachgewiesen werden [8], [9]. Der Flachdachanteil als Eingangsgröße in RE³ASON hat großen Einfluss auf das Ergebnis in Abbildung 1 und somit auf das gesamte solare Flächenpotenzial. Wird in einem Gebäude kein First ermittelt, so wird ihm in Abhängigkeit des Flachdachanteils, entweder ein Flachdach oder ein Schrägdach zugeordnet. Im Falle des Schrägdaches wird angenommen, dass die längste Gebäudekante parallel zum mittigen First verläuft.

3.2 Baunutzungsklassen

Wie in Abbildung 3 dargestellt, wurden die Baunutzungsklassen den Kategorien Wohnen, Gewerbe und öffentliche Versorgung zugeordnet. Die Potenzialflächen der Kategorien wurden in Abbildung 8 für RE³ASON und den Solaratlas dargestellt. Es zeigt sich, dass dem Wohnen zugeordnete Flächen sowohl beim Solaratlas (2,2 bzw. 3,2 GW) als auch bei den Ergebnissen von RE³ASON (2,4 GW) etwa zwei Drittel des gesamten Potenzials ausmachen. Im Falle der RE³ASON-Daten entfallen auf die Kategorien Gewerbe etwa 900 MW und öffentliche Versorgung etwa 640 MW PV-Potenzial, während beim Solaratlas ein Potenzial von 700 bis 1000 MW auf die Gewerbeflächen und auf Flächen, die der öffentlichen Versorgung zugeordnet wurden, 470 bis 640 MW ermittelt wurden. Über die Baunutzungsklassen hinaus ermöglichen die Geodaten der *Realen Nutzung* auch die Zuordnung von Ein- und Zweifamilienhausgebieten. Diese erscheinen insbesondere für die Direktversorgung geeignet und weisen je nach Potenzialkarte etwa 660 MW bis 1 GW Leistung aus. Hier entspricht der Wert aus RE³ASON dem Solaratlas für PV.

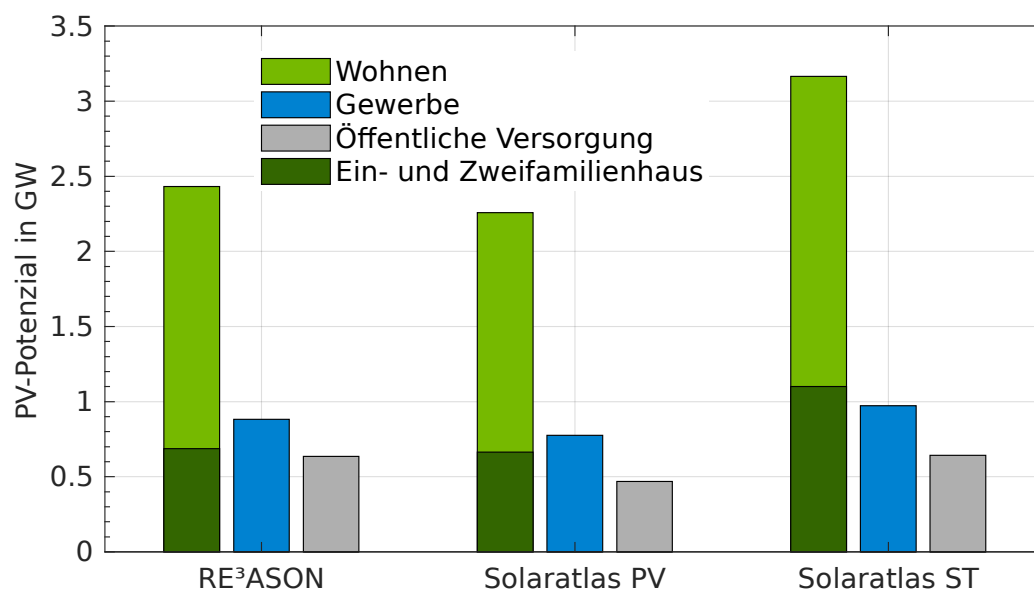


Abbildung 8 Vergleich der Solarpotenzialflächen Berlins bei einem Wirkungsgrad von 15% nach den Kategorien Wohnen (grün), Gewerbe (blau) und öffentliche Versorgung (grau). (RE³ASON-Filter: Dächer größer 15m² Ertrag ist 80% des maximalen Ertrags in Berlin).

3.3 Bezirke und Blocks

Wie bereits erläutert, weist Berlin sehr unterschiedliche Bautypen auf. Daher soll gezeigt werden wie sich die Qualität der Bilderkennung in den Bezirken unterscheidet. In Abbildung 9 ist das Solarpotenzial der Bezirke vergleichend dargestellt.

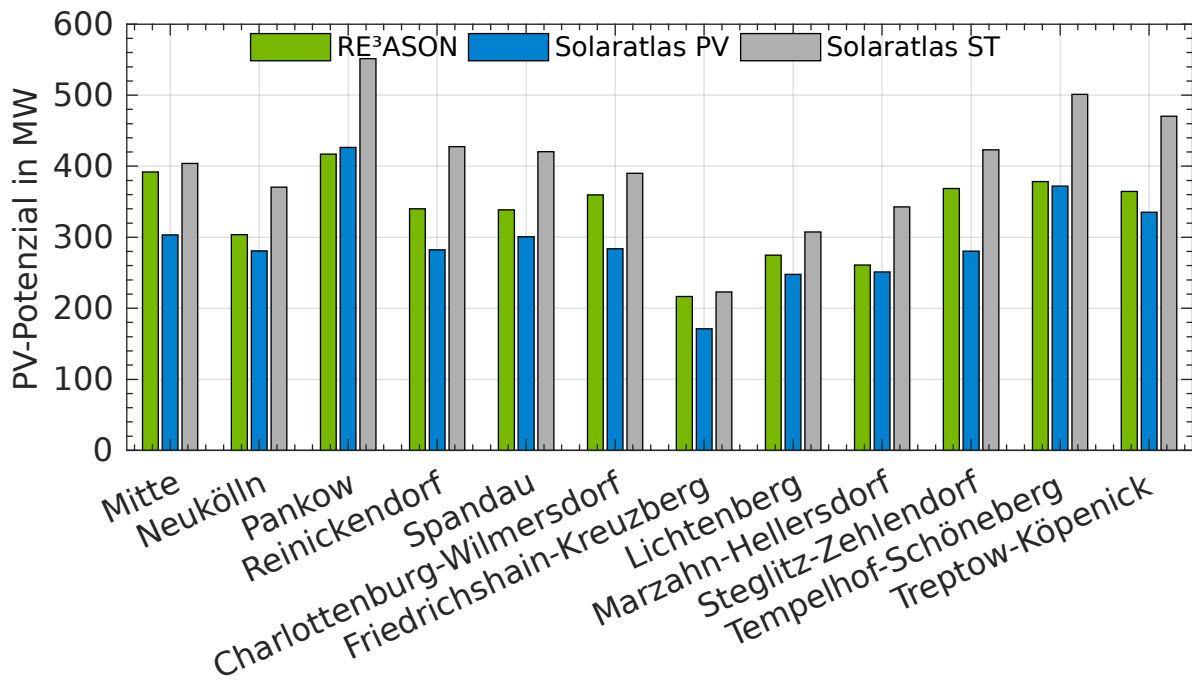


Abbildung 9 Vergleich der Solarpotenzialflächen Berlins bei einem Wirkungsgrad von 15% nach den Kategorien Wohnen (grün), Gewerbe (blau) und öffentliche Versorgung (grau). (RE³ASON-Filter: Dächer größer 15m² Ertrag ist 80% des maximalen Ertrags in Berlin).

Die Ergebnisse der RE³ASON-Simulation schwanken zwischen 97 % bis 130 % des Solarpotenzial des Solaratlases für PV, liegen jedoch meist über den Ergebnissen des 3D Modells. Dabei zeigen sich Unterschiede in den Bezirken. Bezirke in denen eine komplexere Dachgeometrien erwartet werden kann, weisen ein höheres Potenzial bei der Bilderkennung auf, da Dächer in RE³ASON auf wenige Dachformen reduziert werden. Bezirke mit größeren Anteilen an Ein- und Zweifamilienhäusern, wo die Bilderkennung sehr gute Ergebnisse liefert, liefern dahingegen relativ passgenaue Ergebnisse. Neben den Dachgeometrien kann auch die Höhe der Gebäude in den Bezirken von Relevanz sein. Bei homogener Bebauung ist auch mit weniger Verschattung auf den Dachflächen zu rechnen, was eine Abschätzung mit bildgebenden Verfahren begünstigt.

Anhand der Blöcke wurde die Nähe zum Solaratlas für PV in Abbildung 10 ausgewertet. Dargestellt ist die Häufigkeit des Verhältnisses der solaren Potenzialflächen von RE³ASON zu Solaratlas PV in den Blocks. Hierbei zeigt ein Verhältnis von 1, dass das Solarpotenzial aus RE³ASON dem Solaratlas in dem Block entspricht. Es ist zu erkennen, dass das Maxima aller Verteilungen bei einem Verhältnis von 1 liegt, jedoch eine weite Streuung vorliegt. Dabei ist zu beachten, dass der Median beim Wohnen unterhalb, beim Gewerbe oberhalb dieses Wertes liegt. Bei den Blocks, die der öffentlichen Versorgung zugeordnet wurden, liegt dieser bei etwa 1,3. Blocks, die der öffentlichen Versorgung zugeordnet wurden enthalten öfter Gebäude mit komplexeren Dachgeometrien (Krankenhäuser, Gymnasien, Kirchen u.Ä.). Auf der anderen Seite konnten beispielsweise Schul-Neubauten welche nach 1945 errichtet wurden aufgrund ihrer meist klareren Dachstruktur gut zugeordnet werden.

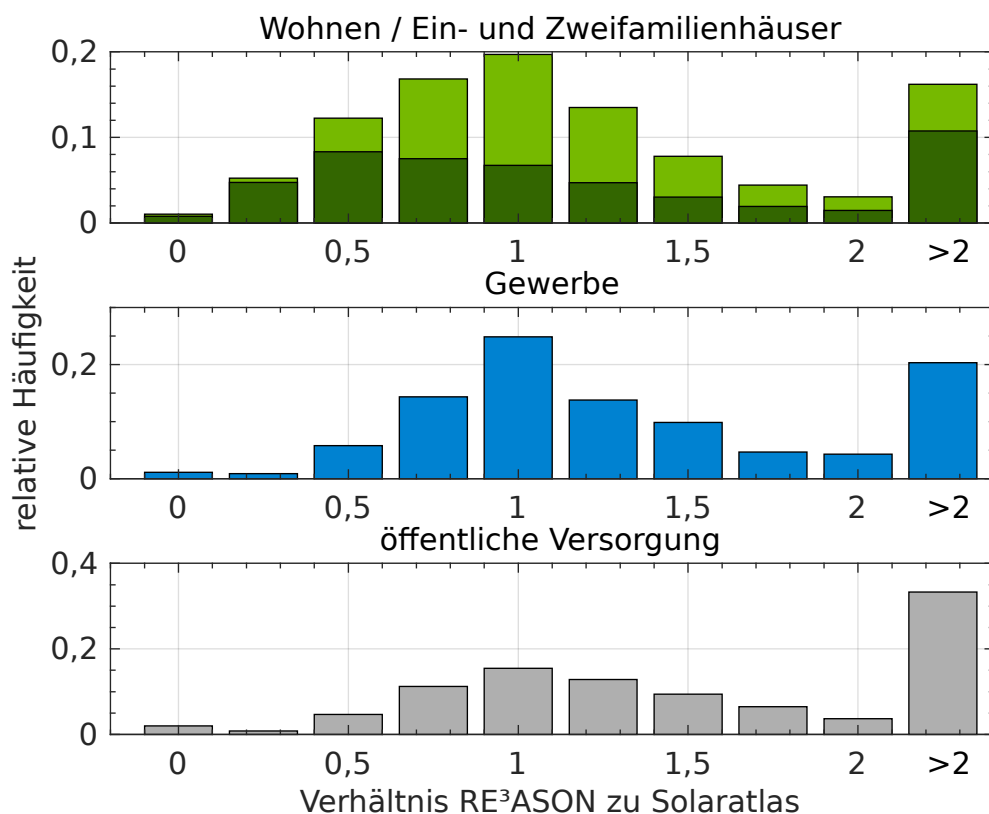


Abbildung 10: Häufigkeit des Verhältnisses der solaren Potenzialflächen von RE³ASON zu Solaratlas PV in den Blocks. (RE³ASON-Filter: Dächer größer 15m² Ertrag ist 80% des maximalen Ertrags in Berlin).

4. Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Beitrag konnte am Beispiel von Berlin gezeigt werden, dass die Solarpotenziale der Stadt bereits mit der Bilderkennung von Dächern ähnlich gut erfasst werden können, wie über die Berechnung mit 3D-Stadtmodellen.

Die Untersuchung zeigt, dass die solare Einstrahlung als Kriterium für die Eignung der Flächen zu einem Ausschluss zahlreicher Flächen führt, die jedoch potenziell geeignet sein könnten. Neben Verschattung und der Größe der Dachflächen sind allerdings weitere Aspekte maßgeblich für die Abschätzung der solaren Erzeugung. Genannt seien hier zum Beispiel die inhärenten Annahmen bezüglich der Belegung der Dachflächen, technische Rahmenbedingungen, Wirtschaftlichkeitsannahmen und unterstellte Nutzung.

Grundsätzlich zeigt die Bilderkennung etwas mehr potenziell nutzbare Flächen, was auf die Unkenntnis über die Verschattungssituation zurückzuführen ist aber auch mit Neubauten zu erklären wäre. Für die Erkennung von Neubauten sind aktuelle Satellitenbilder unentbehrlich. Da frei verfügbare Aufnahmen zum Teil älter sind als es der Solaratlas ist, ist der Nutzen hier nur eingeschränkt zu erkennen.

Es zeigt sich, dass mit Hilfe von RE³ASON zuverlässig Gebäudestrukturen erkannt werden. Durch die stochastische Wahl der Dachneigung ist ein Vergleich einzelner Gebäude jedoch nicht sinnvoll. Das Wissen um den Flachdachanteil verbessert das Ergebnis ungemein, kann jedoch auch nichts zum Gebäudevergleich beitragen. Je mehr Gebäude aggregiert werden, desto besser ist die Aussagekraft, da auch auf Blockebene noch Abweichungen von 100 % und mehr zu sehen sind.

Abschließend sei festgehalten, dass RE³ASON ein Werkzeug darstellt, mit dem Kommunen weltweit eine Aussage zum solaren Erzeugungspotenzial treffen können. Neben der Berechnung des technischen Potenzials der Dachflächen leistet das Programm auch eine ökonomische Bewertung und ist in der Lage, Bestandsanlagen zu erkennen und viertelstündliche Stromerzeugungsprofile zu generieren. Nichtsdestotrotz wird dieses Potenzial in der Realität durch Verschattung vermutlich etwas kleiner ausfallen und stellt somit eine Größenordnung des solaren Potenzials mit zuordenbaren Kosten dar. Genauere Ergebnisse können mit einem 3D-Modell der Region ermittelt werden, welche jedoch auch mit erheblichen Aufwand für die Überfliegung verbunden sind.

In der Summe liefern beide Verfahren Ergebnisse vergleichbarer Größenordnung bezüglich des städtischen Solarpotenzials. Daher können Solarpotenzialkarten nur bei der politischen und wirtschaftlichen Zielsetzung helfen, für die Auslegung und Installation der Anlagen wird auch weiterhin ein geschulter Blick und das Geschick der Solarteure gefordert sein

Danksagung

Die Autoren der HTW Berlin Danken dem Fördermittelgeber für die Ermöglichung des Projektes. Das Vorhaben "PV2City" wird im Berliner Programm für Nachhaltige Entwicklung (BENE) gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung und des Landes Berlin (Förderkennzeichen 1048-BS-0).

Literatur

- [1] simuPLAN, „Solaratlas Berlin - Solarpotential (Eignung pro Gebäude)“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.businesslocationcenter.de/solaratlas>. [Zugegriffen: 14-Nov-2016].
- [2] tetraeder.solar, „Solarpotenzialkataster“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.solare-stadt.de/home/Solarpotenzialkataster>. [Zugegriffen: 17-Jan-2017].
- [3] K. Mainzer, S. Killinger, R. McKenna, und W. Fichtner, „Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques“, *Sol. Energy*, Bd. 155, S. 561–573, Okt. 2017.
- [4] K. Mainzer, D. Schlund, S. Killinger, R. McKenna, und W. Fichtner, „Rooftop PV potential estimations: Automated orthographic satellite image recognition based on publicly available data“, *32nd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, S. 2930–2933.
- [5] Projekt KURAS, „Zukunftsorientierte Anpassung der urbanen Abwasserinfrastruktur – Einzelmaßnahmen“, Berlin, 2016.
- [6] M. Thiele, „Klimaschutzpotenzialanalyse von Dach-, Fassaden- und Straßenbaumbegrünung“, Masterthesis, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH), Eberswalde, 2015.
- [7] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen, „Geoportal Berlin / Solaranlagen - Reale Nutzung (Umweltatlas)“. [Online]. Verfügbar unter: <http://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>. [Zugegriffen: 05-März-2018].
- [8] S. Killinger, K. Mainzer, R. McKenna, N. Kreifels, und W. Fichtner, „A regional optimisation of renewable energy supply from wind and photovoltaics with respect to three key energy-political objectives“, *Energy*, Bd. 84, S. 563–574, Mai 2015.
- [9] Fraunhofer ISE, „Effekte regional verteilter sowie Ost-/West-ausgerichteter Solarstromanlagen“, Agora Energiewende, Fraunhofer ISE, Berlin, 2014.