

Auf dem Weg zur klimaneutralen Stadt 2030 - Quantifizierung des urbanen Solarpotenzials der Landeshauptstadt Dresden

Behnisch, Martin; Hladik, Dirk; Münzinger, Markus; Poglitsch, Hanna

Veröffentlichungsversion / Published Version

Sammelwerksbeitrag / collection article

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Behnisch, M., Hladik, D., Münzinger, M., & Poglitsch, H. (2022). Auf dem Weg zur klimaneutralen Stadt 2030 - Quantifizierung des urbanen Solarpotenzials der Landeshauptstadt Dresden. In G. Meinel, T. Krüger, M. Behnisch, & D. Ehrhardt (Hrsg.), *Flächennutzungsmonitoring XIV: Beiträge zu Flächenmanagement, Daten, Methoden und Analysen* (S. 239-249). Berlin: Rhombos-Verlag. <https://doi.org/10.26084/14dfns-p024>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY Lizenz (Namensnennung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Terms of use:

This document is made available under a CC BY Licence (Attribution). For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Flächennutzungsmonitoring XIV

Beiträge zu Flächenmanagement,
Daten, Methoden und Analysen

IÖR Schriften Band 80 · 2022

ISBN: 978-3-944101-80-4

Auf dem Weg zur klimaneutralen Stadt 2030 – Quantifizierung des urbanen Solarpotenzials der Landeshauptstadt Dresden

*Martin Behnisch, Dirk Hladik, Markus Münzinger,
Hanna Poglitsch*

Behnisch, M.; Hladik, D.; Münzinger, M.; Poglitsch, H.
(2022): Auf dem Weg zur klimaneutralen Stadt 2030 – Quantifizierung des urbanen Solarpotenzials der Landeshauptstadt Dresden. In: Meinel, G.; Krüger, T.; Behnisch, M.; Ehrhardt, D. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XIV. Beiträge zu Flächenmanagement, Daten, Methoden und Analysen. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 80, S. 239-249.

DOI: <https://doi.org/10.26084/14dfns-p024>

Auf dem Weg zur klimaneutralen Stadt 2030 – Quantifizierung des urbanen Solarpotenzials der Landeshauptstadt Dresden

Martin Behnisch, Dirk Hladik, Markus Münzinger, Hanna Poglitsch

Zusammenfassung

Um das angestrebte Ziel der Klimaneutralität für die Landeshauptstadt Dresden zu erreichen, ist eine aktualisierte Betrachtung aller Potenziale von erneuerbaren Energien im Rahmen der Fortschreibung des Energie- und Klimaschutzkonzeptes auf dem Stadtgebiet notwendig. Bauwerksintegrierte Photovoltaik (BIPV) leistet einen hohen Beitrag an der erforderlichen Energiewende, für die eine Quantifizierung des technischen Potenzials nötig ist. Für das gesamte Stadtgebiet Dresdens wurde auf Grundlage eines virtuellen 3D-Stadtmodells die solare Einstrahlung auf allen Dach- und Fassadenflächen berechnet. Diese Modellierung ermöglicht, unter Anwendung flächenspezifischer Abschläge, eine qualifizierte Abschätzung des Photovoltaikpotenzials. Die Kombination der gebäudescharfen Solarpotenziale mit thematischen GIS-Datensätzen der Stadt Dresden und semantischen Attributen des 3D-Stadtmodells ermöglicht darüber hinaus eine detaillierte Auswertung nach verschiedenen Bauwerkskategorien und Nutzungstypen. Die Identifikation von Bauwerkskategorien mit großem Flächenpotenzial sowie die Berücksichtigung von Eigentumsstrukturen und Denkmalschutzaspekten bietet eine gezielte Unterstützung zur Aktualisierung der PV-Gebäudepotenziale in Dresden und zur Ableitung von konkreten Maßnahmen.

Schlagwörter: Klimaneutrale Stadt, Erneuerbare Energien, Solarpotenziale, Urbane Energie- und Klimaschutzkonzepte, Monitoring

1 Einführung

Energiekrise und Klimaziele, Atomausstieg und Ausbau der erneuerbaren Energien – um sich diesen aktuellen Krisen, Entwicklungen und Herausforderungen zu stellen, muss die Baubranche umweltgerechte, ressourcenschonende und energieeffiziente Lösungen anbieten und umsetzen. Aktuelle Studien zum zukünftigen, auf erneuerbaren Energien beruhenden, Energiesystem heben die Bedeutung von Photovoltaik für die Umsetzung der Transformation des Energiesystems hervor (Henning, Palzer 2013, 2015; Sterchele et al. 2020). In Deutschland wird im Jahr 2050 von einem Bedarf von 450 GWp an installierter elektrischer PV-Leistung ausgegangen, wovon etwa 300 GWp an Gebäuden installiert werden sollen (Eggers et al. 2020). Module der bauwerksintegrierten Photovoltaik (BIPV) können einen entscheidenden Beitrag leisten, indem diese als Teile der

Gebäudehülle in Form von Fassaden- oder Dachmodulen integriert werden. Ein großer Vorteil von BIPV gegenüber Photovoltaik-Freiflächenanlagen ist die verbrauchsnahe Stromproduktion. Zudem wird keine Fläche zur Aufstellung der Module beansprucht. Während viele Städte das Potenzial von Gebäudedächern zur solaren Energiegewinnung bereits in Solarkatastern führen und damit Anreize zur Installation von PV-Modulen schaffen, sind Gebäudefassaden bisher kaum adressiert (Fath et al. 2015). Die flächendeckende Verfügbarkeit von dreidimensionalen Daten zum Gebäudebestand ermöglicht es in jüngster Zeit, analog zum Potenzial der Dachflächen, auch Gebäudefassaden in Bezug auf ihre Eignung für BIPV einzuschätzen und damit die vertikale Stadt als solare Energiequelle perspektivisch stärker zu nutzen. Aktuell besteht ein enormer Bedarf an raumbezogenen Erkenntnissen, die der begründeten Entscheidungsfindung zum Ausbau von bauwerksintegrierter Photovoltaik dienen.

Vor diesem Hintergrund erfolgt in diesem Beitrag die Vorstellung von Resultaten aus der „PV-Gebäude-Potenzialstudie für die Landeshauptstadt Dresden“. Es handelt sich um die vertiefende modellbasierte kumulierte Ermittlung der theoretischen PV-Potenziale für einen urbanen Gebäudebestand mit engen Bezügen zu dem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt „Standard-BIPV“ (Förderkennzeichen 0324063), welches neben raumbezogenen Analysen und Simulationen der Solarpotenziale als übergeordnetes Ziel die Entwicklung von standardisierten BIPV-Bauelementen mit integrierter elektrischer Systemtechnik verfolgt („Plug and Power“). Die Landeshauptstadt Dresden wurde zudem kürzlich als eine von hundert Städten für die EU-Mission «100 klimaneutrale und intelligente Städte bis 2030» ausgewählt. Gegenstand dieser Forschungs- und Innovationsmaßnahme sind saubere Mobilität, Energieeffizienz und grüne Stadtplanung (EC, 2022). Auch in Zusammenhang mit dieser Förderkulisse erlangt die Quantifizierung von urbanen Solarpotenzialen besondere Relevanz.

2 Ausgangssituation für die Landeshauptstadt Dresden

Entgegen der Zielstellung des Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzepts (IEK) der Landeshauptstadt Dresden (LHD) aus dem Jahre 2013 sank der Treibhausgasausstoß im Dresdner Stadtgebiet in den letzten Jahren kaum. Eine Emissionsreduktion um 41 Prozent wurde bereits in der ersten Beschlussfassung des IEK bis 2030 anvisiert. Im Jahr 2020 wurden vom Dresdner Stadtrat die Fortschreibung der formulierten Klimaschutzziele insgesamt und die Überarbeitung des bestehenden Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzepts beschlossen. Klimaschutz wird nach diesem Beschluss als kommunale Aufgabe von höchster Priorität definiert – dies sowohl für die Daseinsvorsorge der LHD als auch die städtischen Beteiligungsgesellschaften. Intensiviert wird der Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) unter Gesichtspunkten des Klimaschutzes, der Dämpfung der Energiepreisanstiege und im Hinblick auf die Unabhängigkeit im Sinne der Reduktion der Importabhängigkeit von Energieträgern bzw. zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit auf

dem Stadtgebiet der LHD. Raumbezogene Analysen der EE-Potenziale – insbesondere der Solarpotenziale – schaffen einen Mehrwert sowohl für städtische Akteure als auch Investoren im Stadtgebiet bzw. Adressaten inner- und außerhalb der Verwaltung und unterstützen die effiziente Erschließung dieser Potenziale. Die Fortschreibung des IEK berücksichtigt den technischen Fortschritt bei PV-Anlagen, die Veränderungen im urbanen Gebäudebestand der LHD und adressiert neben der Abschätzung von Potenzialen im Dachbereich nun auch erstmals die Fassadenpotenziale.

3 Modellierungsansatz für die urbanen Solarpotenziale

Grundlage für die „PV-Gebäude-Potenzialstudie“ ist eine Modellierung der solaren Einstrahlung für die LHD, welche durch das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung in Dresden und die Technische Universität München (TUM) im Rahmen des Forschungsprojekts „Standard-BIPV“ entstanden ist. Auf Grundlage des virtuellen 3D-Stadtmodells Dresden aus dem Jahr 2019 wurde die solare Einstrahlung auf allen Dächern und Fassaden der 135 583 enthaltenen Gebäude berechnet.

3.1 Modellierung der solaren Einstrahlung

Die Modellierung wurde mit dem am Lehrstuhl für Geoinformatik der TUM entwickelten Werkzeug zur Solarpotenzialanalyse auf Basis von semantischen 3D-Stadtmodellen durchgeführt (Willenborg et al. 2018). Als Berechnungsgrundlage wird auf den einzelnen Teilflächen (Dächer und Fassaden) des Gebäudemodells ein Raster aus Samplingpunkten erzeugt, bei dem der mittlere Punktabstand 2 m beträgt. Für jeden Samplingpunkt werden die direkte und die diffuse Strahlung berechnet, während die reflektierte Strahlung aktuell nicht berücksichtigt wird. Die Modellierung auf Basis semantischer 3D-Stadtmodelle ermöglicht die Berücksichtigung verschiedener 3D-Verschattungsobjekte. Für die vorliegende Strahlungsanalyse wurde die Verschattung durch die umliegende Bebauung, die Topographie sowie durch den urbanen Baumbestand berücksichtigt (Abb. 1). Die Berücksichtigung der Verschattung durch Bäume ist speziell für die Modellierung der Strahlungswerte auf Fassaden wichtig. Der urbane Baumbestand der Stadt Dresden konnte auf Basis von Laserscandaten flächendeckend modelliert und in das 3D-Stadtmodell integriert werden (Münzinger et al. 2022).

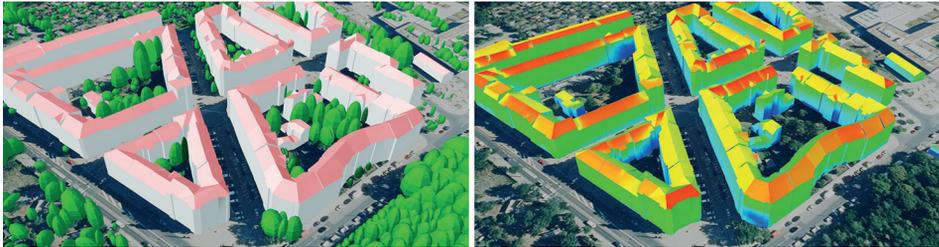


Abb. 1: Modellierung der solaren Einstrahlung. (a) Eingangsdaten der Modellierung: LoD2-Gebäudemodell und Baummodell. (b) Ergebnis dargestellt als Solartexturen auf den Gebäudeflächen. (Rot = hohe Strahlung, blau = geringe Einstrahlung) (Quelle: eigene Bearbeitung; Datenbasis: GeoSN, dl-de/by-2-0)

3.2 Ermittlung des möglichen Ertragspotenzials

Bei der Modellierung der solaren Einstrahlung wurden alle im Gebäudemodell vorhandenen Dächer und Fassaden berücksichtigt, ungeachtet ihrer möglichen Eignung zur Installation bauwerksintegrierter PV. Um eine qualifizierte Abschätzung des möglichen Ertrags vornehmen zu können, werden auf die berechnete Einstrahlung gebäude- und flächenspezifische Kriterien angewandt. Die einzelnen Potenzialbegriffe sowie die angewendeten Abschläge und Ausschlüsse sind in Abbildung 2 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

Als **theoretisches Potenzial** ist die auf einem Gebäude im Jahresverlauf auftreffende solare Einstrahlung unter Berücksichtigung von Gebäudemerkmalen und Ausschlussflächen definiert. Denkmalgeschützte Gebäude (11 % des Gesamtbestandes) werden von der Betrachtung ausgeschlossen, da an solchen nur nachrangig und in Ausnahmefällen PV-Module angebracht werden sollen. Ebenso werden alle Fassaden ohne südliche Ausrichtung ausgeschlossen, da diese vergleichsweise wenig Strahlung erhalten und für die konkreten Ausbaupläne nachrangigen Charakter haben. Der Ausschluss von Flächen unterhalb von 4 m dient dem präventiven Schutz vor Vandalismus. Die Mindestfläche von 7 m² schließt Teilflächen aus, die für eine Installation von PV-Modulen aufgrund ihrer geringen Größe weniger geeignet sind.

Das **theoretisch-technische Potenzial** ist als theoretisches Potenzial unter Anwendung flächenspezifischer Abschläge definiert. Im vorliegenden 3D-Gebäudemodell sind standardisierte Dachformen mit einer Höhengengenauigkeit von 1 m modelliert. Während Gauben und größere Aufbauten erfasst wurden, sind kleinere Aufbauten aufgrund der Modellkomplexität nicht modelliert. Die dadurch unberücksichtigten, solar nicht nutzbaren Bereiche, werden durch den Abschlag „Dachaufbauten“ erfasst. Der zusätzliche Abschlag für „Dachverschattung durch Aufbauten“ dient der Berücksichtigung der nicht modellierten Verschattung durch diese Aufbauten. Für Fassadenflächen werden die nicht nutzbaren Tür- und Fensterflächen berücksichtigt und ausgeschlossen.

Die Tatsache, dass eine Potenzialfläche in der Praxis meist nicht vollständig mit Modulen belegt werden kann, wird durch den Belegungsgrad berücksichtigt. Die Abschläge wurden basierend auf bisherigen Studien veranschlagt (Eggers et al. 2020) und nach Rücksprache mit der LHD an den bestehenden Datensatz angepasst.

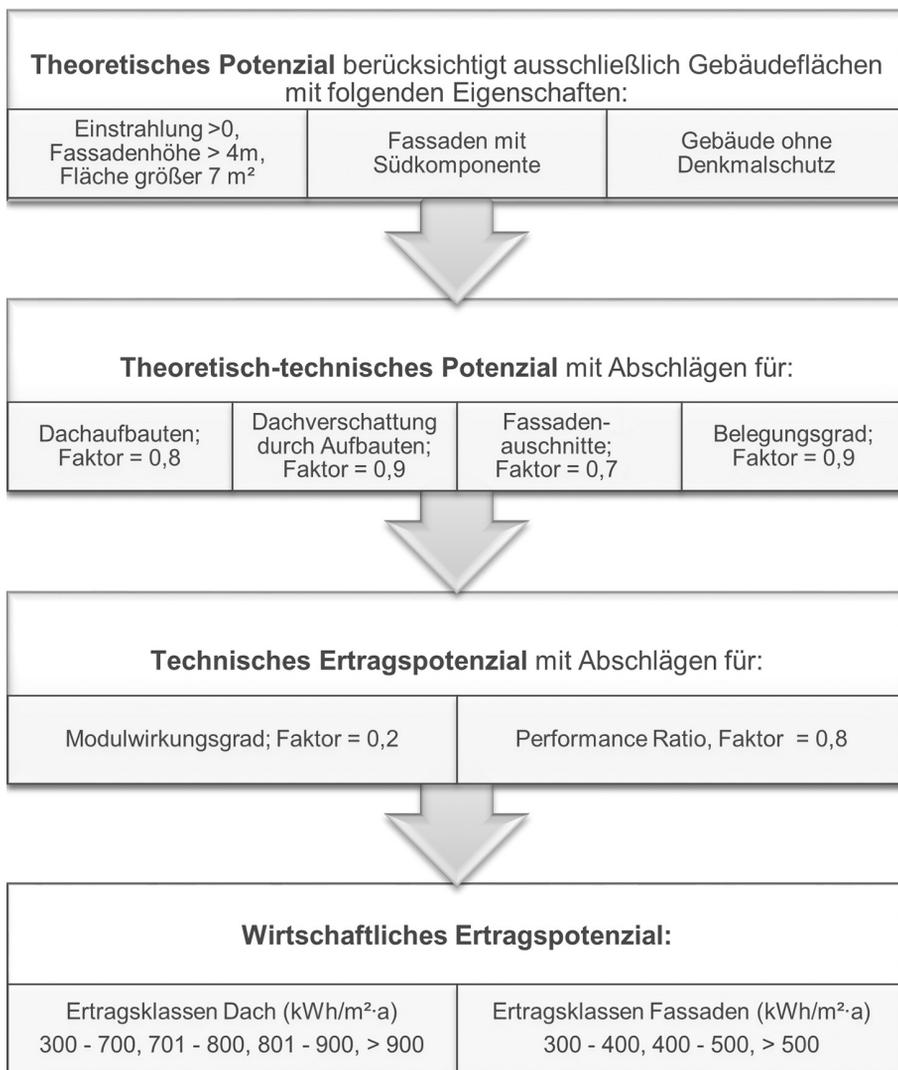


Abb. 2: Schrittweise Potenzialentwicklung vom theoretischen Einstrahlungspotenzial zum technischen und wirtschaftlichen Ertragspotenzial (Quelle: eigene Bearbeitung)

Das **technische Ertragspotenzial** ergibt sich über ein einfaches Ertragsmodell, welches den elektrischen Wirkungsgrad für PV-Module bei Auslegungsbedingungen sowie den mittleren jährlichen Wirkungsgrad für die restliche Installation über die „Performance Ratio“ berücksichtigt (Eggers et al. 2020).

Zur Betrachtung des **wirtschaftlichen Ertragspotenzials** wird das technische Ertragspotenzial nach Einstrahlungsklassen für Dächer und Fassaden ausgewiesen. Dadurch können in einer detaillierten Auswertung leicht erschließbare Potenziale identifiziert werden. Die Ertragsklassen für Dächer und Fassaden wurden in Anlehnung an das bestehende Solarkataster der LHD definiert. Fassaden und Dächer mit einer mittleren Einstrahlung unter $300 \text{ kWh/m}^2\text{-a}$ werden durch die Klassifikation ausgeschlossen.

3.3 Themenspezifische Auswertung der Solarpotenziale

Die Kombination der gebäudescharfen Solarpotenziale mit thematischen GIS-Datensätzen der Stadt Dresden und semantischen Attributen des 3D-Gebäudemodells ermöglicht Auswertungen nach verschiedenen Bauwerkskategorien und Nutzungstypen. Solch eine Auswertung unterstützt die Aktualisierung des Maßnahmenkatalogs durch eine detaillierte Ausweisung möglicher Potenziale.

Offizielle Gebäudemodelle umfassen in Deutschland mehrere Attribute für jedes Gebäude wie z. B. die Höhe und die Gebäudefunktion (BKG 2022). Für weitere detaillierte Auswertungen wurden für die Dach- und Fassadenflächen jedes Gebäudes geometrische Attribute berechnet. Diese umfassen die horizontale Ausrichtung der Flächen, deren Größe sowie die Neigung der Dachflächen. Eine räumliche Verschneidung der Gebäudegrundrisse mit thematischen 2D-Datensätzen der Stadt Dresden ermöglicht die Identifikation von Gebäuden mit Denkmalschutz, Eigentumsstrukturen oder eine Zuordnung zu kommunalen Verwaltungseinheiten.

4 Ergebnisse

Die ermittelten Ergebnisse aus der Potenzialstudie Dresden machen deutlich, dass ein spürbarer Versorgungsbeitrag durch Gebäude-PV möglich ist. Der gesamte Stromverbrauch Dresdens liegt bei etwa $2\,600 \text{ GWh/a}$. Der maximale ermittelte technische Ertrag aller Dächer und Fassaden der LHD liegt unter Berücksichtigung der definierten Filterkriterien und Abschlägen bei $1\,943 \text{ GWh/a}$. Abbildung 3 verdeutlicht die abschlagsbasierte Potenzialberechnung auf Grundlage der Modellierungsergebnisse.

In Bezug auf die Fortschreibung des Energie- und Klimaschutzkonzeptes erfolgt eine getrennte Ausweisung der Potenziale an denkmalgeschützten Gebäuden. Diese sollen nur nachrangig mit Photovoltaik ausgestattet werden und werden in der weiteren Betrachtung nicht mehr berücksichtigt. Ungeachtet dessen fällt mit einem technischen Ertrag von 447 GWh/a ein Viertel des Gesamtertrags auf denkmalgeschützte Gebäude. Für alle modellierten Gebäude beträgt das theoretische PV-Potenzial („Pot. theor.“) auf Dächern und Fassaden $18\,855 \text{ GWh/a}$. Durch Ausschluss der denkmalgeschützten Gebäude bleibt ein Potenzial von $14\,518 \text{ GWh/a}$. Durch die Anwendung der flächenspezifischen Abschläge (Abb. 3) auf das theoretische Potenzial wird das theoretisch

technische Einstrahlungspotenzial („Pot. theor. techn.“) von insgesamt 9 353 GWh/a abgeleitet, woraus sich der technische Ertrag von 1 493 GWh/a ergibt. Davon entfallen 1 190 GWh/a auf Dächer und 307 GWh/a auf Fassaden.

Solarpotenziale Gebäudebestand LHD

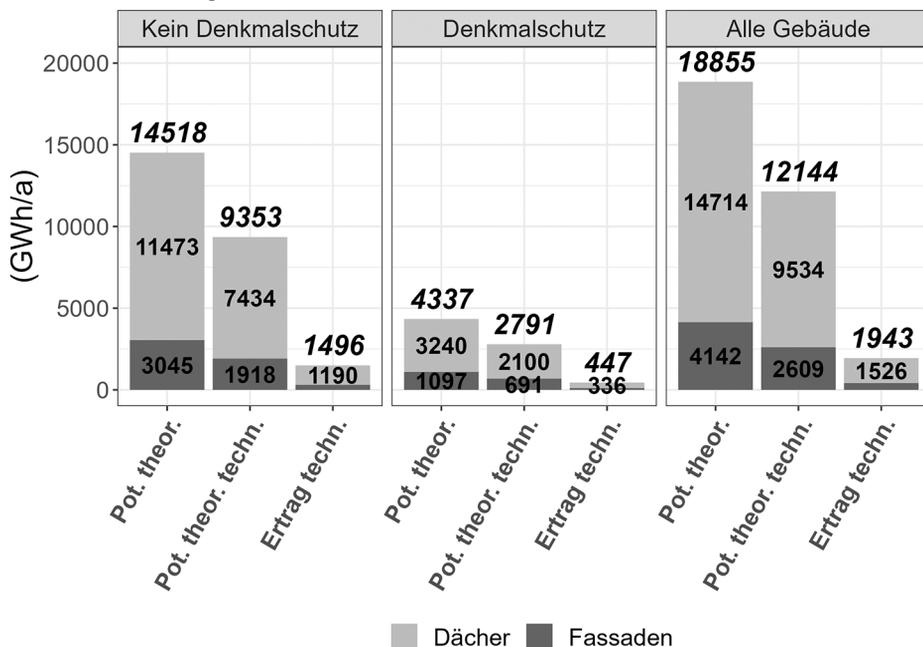


Abb. 3: Ermitteltes theoretisches Einstrahlungspotenzial (Pot. theor.), theoretisch-technisches Einstrahlungspotenzial (Pot. theor. techn.) und technisches Ertragspotenzial (Ertrag techn.) von gebäudeintegrierter Photovoltaik für die LHD (Quelle: eigene Bearbeitung)

Zur Quantifizierung der Gebäudeart mit dem höchsten Ertragspotenzial wird der Datensatz nach der Gebäudenutzung innerhalb der definierten Ertragsklassen klassifiziert (Abb. 4). Fassaden und Dächer mit einer mittleren Einstrahlung unter 300 kWh/m²-a werden durch die Klassifikation ausgeschlossen, da diese wirtschaftlich nicht relevant erscheinen. Wohngebäude bieten in der LHD das größte Potenzial, sowohl auf Dächern als auch auf Fassaden. Dächer mit hoher solarer Einstrahlung in den obersten Ertragsklassen ab 800 kWh/(m²-a), welche als effizient erschließbar angesehen werden, bieten bereits 751 (374+377) GWh/a möglichen Solarertrag. Insgesamt wird deutlich, dass auch Fassaden-PV mit 114 GWh/a in der höchsten Ertragsklasse an geeigneten Standorten einen nennenswerten Beitrag leisten kann.

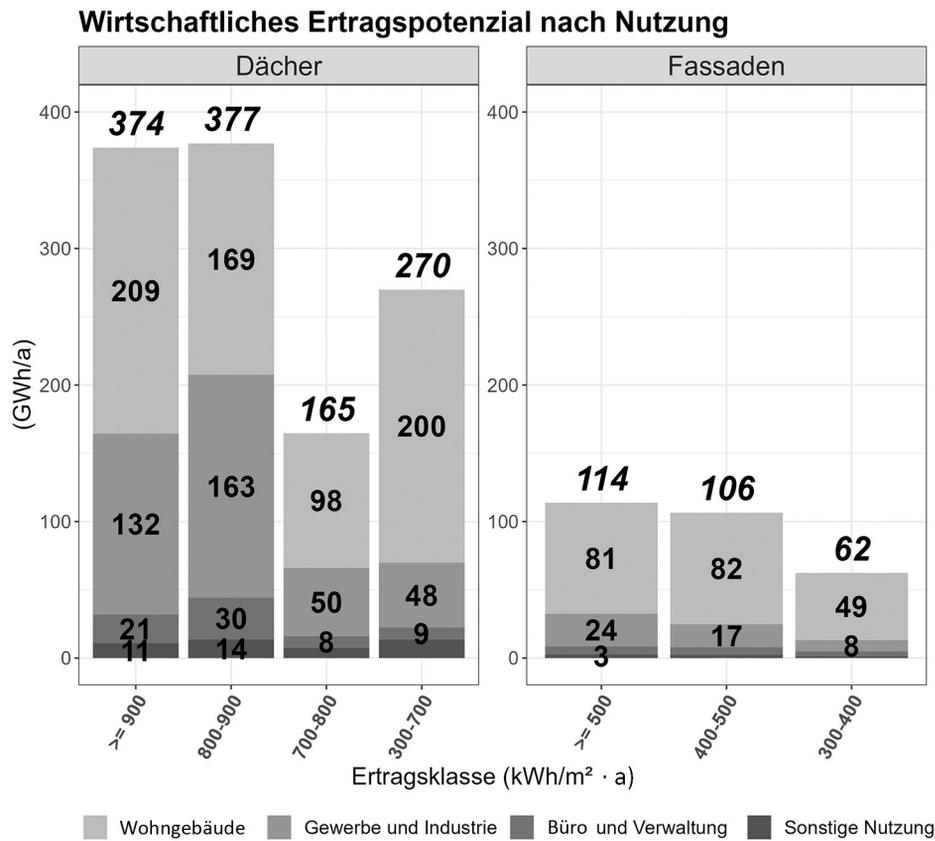


Abb. 4: Wirtschaftliches Ertragspotenzial je Gebäudenutzungs-kategorie (Quelle: eigene Bearbeitung)

Um einen detaillierten Blick über die Erträge auf dem Dach zu erhalten, werden verschiedene Dachneigungsklassen in den jeweiligen Ertragsklassen dargestellt (Abb. 5). Hier zeigt sich deutlich, dass die höchsten Erträge auf Flachdächern bzw. Dächern mit einer Neigung bis 15° zu erzielen sind. Um besonders attraktive zusammenhängende Flächen zu ermitteln, werden auch Dächer ab 100 m² Fläche getrennt ausgewiesen. Hier zeigt sich ebenfalls das sehr hohe Potenzial auf den Dächern mit Dachneigung bis 15°.

Wirtschaftliches Ertragspotenzial nach Dachneigung und Dachgröße

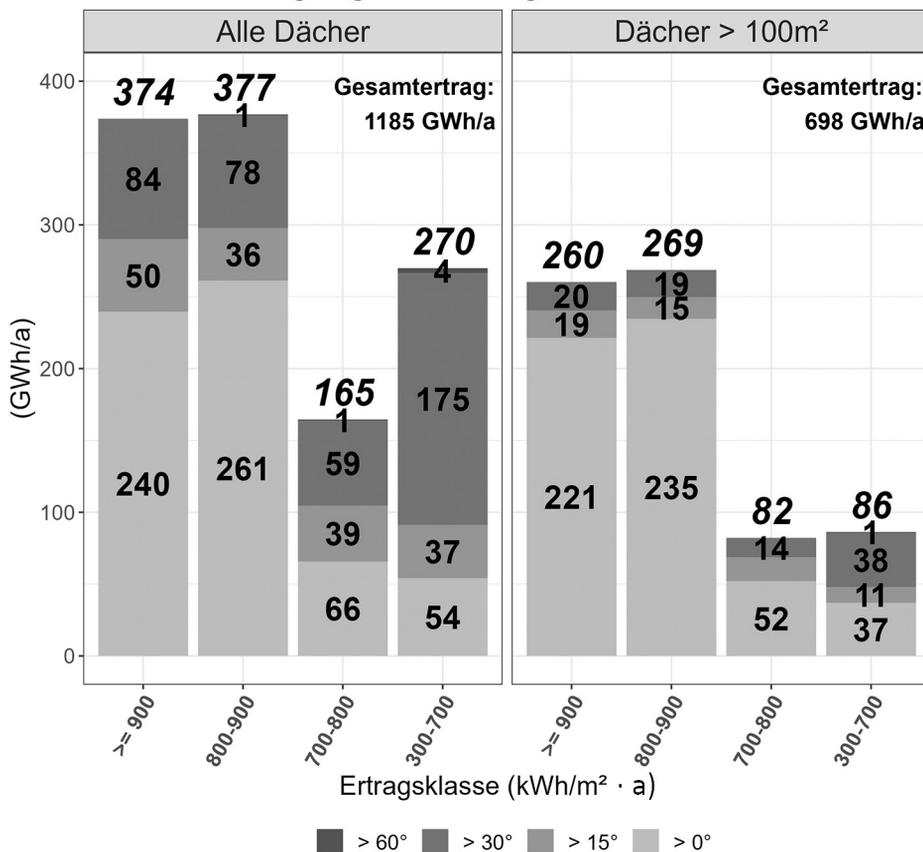


Abb. 5: Wirtschaftliches Ertragspotenzial nach Dachneigung für alle Dächer und für Dächer mit einer Fläche größer 100 m² (Quelle: eigene Bearbeitung)

5 Fazit

Raumbezogene Analysen unterstützen die begründete Entscheidungsfindung zum Ausbau von bauwerksintegrierter Photovoltaik und ermöglichen die Identifikation von Gebäudeflächen mit erhöhtem theoretischem Potenzial, so dass im Anschluss eine Abschätzung von erzielbarer elektrischer Leistung und wirtschaftlichem Potenzial möglich wird.

Zur Erstellung eines wirkungsvollen Energiekonzepts sind, neben der Ermittlung von verfügbaren Datengrundlagen, die Beteiligung relevanter Akteure innerhalb und außerhalb der Verwaltung, die Entwicklung und Priorisierung von Maßnahmen zur Zielerreichung sowie ein raumbezogenes Monitoring von besonderer Relevanz.

Mit Blick auf die Bestimmung der Potenziale von erneuerbaren Energien empfiehlt sich die Entwicklung von georeferenzierten, digitalen Werkzeugen zur Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung. Diese sollten zunächst verlässliche Analyseergebnisse erbringen und mit erweiterten Informationen derart kombinierbar sein, dass lokal- oder akteurspezifische Maßnahmen ableitbar sind. Idealerweise können Maßnahmen digital veranschaulicht und in ihrer Wirksamkeit bewertet werden. Zudem ist eine eigenständige Weiterbearbeitung und Aktualisierbarkeit der Datensätze sowie Weiterentwicklung der Werkzeuge und ihrer Routinen mit vorzuhalten.

Perspektivisch sind Beratungs- und Entwicklungsleistungen aus der Wissenschaft und Ansätze des Co-Design und der Co-Creation aus Sicht der Autor*innen dieses Beitrages vermehrt zu verfolgen, um die Transformation hin zu einem klimaneutralen Gebäudebestand zu unterstützen, Potenziale der erneuerbaren Energien zu identifizieren und innovative Lösungsansätze im Kontext von urbanen Energie- und Klimaschutzkonzepten bereitzustellen.

6 Literatur

- Behnisch, M.; Münzinger, M.; Poglitsch, H.; Willenborg, B.; Kolbe, T. H. (2020): Anwendungsszenarien von Geomassendaten zur Modellierung von Grünvolumen und Solarflächenpotenzial. <https://doi.org/10.26084/12DFNS-P025>
- BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2022): Dokumentation 3D Gebäudemodell Deutschland – LoD2.
- Eggers, J.-B.; Behnisch, M.; Eisenlohr, J.; Poglitsch, H.; Phung, W.-F.; Münzinger, M.; Ferrara, C.; Kuhn, T. (2020): PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland. In: 35. PV-Symposium. Kloster Banz, Bad Staffelstein: 837-856.
- EC – European Commission. Directorate General for Research and Innovation (2022): EU missions: 100 climate neutral and smart cities. Publications Office, LU.
- Fath, K.; Stengel, J.; Sprenger, W.; Wilson, H. R.; Schultmann, F.; Kuhn, T. E. (2015): A method for predicting the economic potential of (building-integrated) photovoltaics in urban areas based on hourly Radiance simulations. *Solar Energy* 116: 357-370. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.023>
- Henning, H.-M.; Palzer, A. (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050 (Studienpapier). Fraunhofer ISE, Freiburg.
- Henning, H.-M.; Palzer, A. (2013): Energiesystem Deutschland 2050: Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien (Studienpapier). Fraunhofer ISE, Freiburg.

- Münzinger, M.; Prechtel, N.; Behnisch, M. (2022): Mapping the urban forest in detail: From LiDAR point clouds to 3D tree models. *Urban Forestry & Urban Greening* 74: 127637. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127637>
- Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Senkpiel, C.; Haun, M.; Jürgens, P.; Kost, C.; Schlegl, T.; Bett, A.; Henning, H.-M. (2021): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen (Studienpapier). Fraunhofer ISE, Freiburg.
- Willenborg, B.; Sindram, M.; Kolbe, T. H. (2018): Applications of 3D City Models for a Better Understanding of the Built Environment. In: Behnisch, M.; Meinel, G. (Eds.): *Trends in Spatial Analysis and Modelling, Geotechnologies and the Environment*. Springer International Publishing, Cham: 167–191. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52522-8_9