



TAGUNGSUNTERLAGEN

# 35. PV-Symposium

01./02. September 2020

**Hinweis:**

Der vollständige Tagungsband kann unter folgendem Link abgerufen werden:

<https://www.pv-symposium.de/pv-symposium/tagungsunterlagen>

## **IMPRESSUM**

Angaben gemäß § 5 TMG:

Conexio GmbH  
Kiehnlestraße 16  
75172 Pforzheim  
Deutschland

Tel.: +49 7231 58598-182  
Fax: +49 7231 58598-28  
E-Mail: [info@conexio.expert](mailto:info@conexio.expert)

Geschäftsführung: Bernd Porzelius  
Amtsgericht Mannheim, HRB 728275

Umsatzsteuer-Identifikationsnummer: DE313252229

**ISBN 978-3-948176-09-9**

© 2020 Conexio GmbH, Pforzheim, Deutschland

Die Rechte an den Einzelbeiträgen liegen beim jeweiligen Verfasser; Rechte am Gesamtwerk liegen bei der Conexio GmbH.  
Nachdruck oder Vervielfältigung, auch teilweise oder in umgestalteter Form, ist nur mit Zustimmung durch die Conexio GmbH bzw. durch den Verfasser des Einzelbeitrages gestattet.



# **PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland**

Autoren: Jan-Bleicke Eggers (jan-bleicke.eggerts@ise.fraunhofer.de, +49 761 4588-2067)<sup>1</sup>, Martin Behnisch<sup>2</sup>, Johannes Eisenlohr<sup>1</sup>, Hanna Poglitsch<sup>2</sup>, Windy-Fook Phung<sup>1</sup>, Markus Münzinger<sup>2</sup>, Claudio Ferrara<sup>3</sup>, Tilmann E. Kuhn<sup>1</sup>

## **Zusammenfassung**

Dieser Beitrag stellt eine zweistufige, wissenschaftliche Methode zur gebäudescharfen BIPV-Potenzialanalyse vor, die in Form einer Vollanalyse des deutschen Gebäudebestands nicht nur Dachflächen, sondern auch Fassaden in die Erhebung mit einbezieht und dabei den Einfluss von Verschattung für jede Teilfläche der Gebäudehülle per Strahlenganganalyse detailliert berücksichtigt. Im Ergebnis liegen die Flächenpotenziale, die darauf installierbaren elektrischen PV-Leistungen sowie die daraus zu erwartenden elektrischen Energieerträge für jede Teilfläche eines jeden Gebäudes im Untersuchungsgebiet vor. Die Methode wird am Beispiel der Stadt Dresden sowie in vereinfachter Form für Deutschland demonstriert.

Im Vergleich zum Energiebedarf der Stadt Dresden sowie mit der jüngst erschienenen Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im gesellschaftlichen Kontext“ werden die Bedeutung und das Potenzial der bauwerksbezogenen Photovoltaiknutzung für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende deutlich.

## **Einleitung**

Aus technischer und systemischer Sicht lassen sich die Klimaschutzziele im Bereich der Energieversorgung auf Basis der Nutzung erneuerbarer Energien erreichen – und Windenergienutzung und Photovoltaik stellen die beiden zentralen Säulen einer solchen klimaneutralen Energieversorgung Deutschlands dar. Dies sind zwei zentrale Ergebnisse der jüngst (im Februar 2020) erschienenen Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im gesellschaftlichen Kontext“ in der die jeweils kostengünstigste Umsetzung einer 95%- bzw. 100%-tigen Verringerung der energiebezogenen Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 gegenüber 1990 in sechs Szenarien untersucht wurde [1].

---

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg; [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Weberplatz 1, D-01217 Dresden; [www.ioer.de](http://www.ioer.de)

<sup>3</sup> ehemals Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg

	Referenz	Beharrung	Inakzeptanz	Suffizienz	Referenz100	Suffizienz2035
CO <sub>2</sub> -Reduktionsziel	95 %	95 %	95 %	95 %	100 %	100 %
<b>Obergrenzen für installierte Kapazität in GW<sub>el</sub></b>						
Photovoltaik	530 <sup>6</sup>	530	800 <sup>7</sup>	530	530	530
Wind Onshore	230	230	80	230	230	230
Wind Offshore	80	80	40	80	80	80
Stromimport	40	40	20	40	40	40
<b>Verbrauchsentwicklung</b>						
Klassische Stromanwendungen	konstant	konstant	konstant	sinkend	konstant	sinkend
Verkehrsleistung / Vorgaben	steigend	steigend teilweise Verbrenner	steigend ohne OLKW	sinkend	steigend	sinkend
beheizte Gebäudefläche / Vorgaben	steigend	steigend teilweise Gaskessel	steigend	sinkend	steigend	sinkend
Prozesswärme	leicht sinkend	leicht sinkend	leicht sinkend	sinkend	leicht sinkend	sinkend

Abbildung 1: Übersicht über die Szenariendefinitionen in der Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im gesellschaftlichen Kontext“ [1] S. 18



Abbildung 2: Ergebnisse an installierter elektr. Leistung an Photovoltaik- und Windenergieanlagen in den ersten vier Szenarien der Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im gesellschaftlichen Kontext“ [1] S. 26

Diese neuen Ergebnisse bestätigen die Aussagen zur Bedeutung der Photovoltaik aus den älteren Studien [2, 3] nicht nur, sondern ergeben sogar einen deutlich höheren Bedarf an installierter Photovoltaik. Während aus den bisherigen Studien, je nach Szenario, 2050 ein Bedarf von 120 GW<sub>p</sub> bis 290 GW<sub>p</sub> an installierter PV-Leistung folgte, sind es in der aktuellen Studie 300 GW<sub>p</sub> (Szenario „Suffizienz“) bis 645 GW<sub>p</sub> (Szenario „Inakzeptanz“) zum Erreichen des 95%-Reduktionsziels. Das Referenzszenario liegt mit einer Kapazität von 414 GW<sub>p</sub> etwas unterhalb der Mitte dieser Werte. Einen Überblick über die Unterschiede zwischen den Szenariendefinitionen bietet Abbildung 1. Die Ergebnisse hinsichtlich der zu installierenden elektrischen Leistung an Windenergie- und Photovoltaikanlagen lassen sich Abbildung 2 entnehmen. Im Vergleich zum heutigen Ausbaustand von etwa 49 GW<sub>p</sub> entsprechen diese Werte einer Steigerung um den Faktor 6 bis 13.

Eine weitreichende Nutzung von bauwerksintegrierter Photovoltaik (BIPV) bei der Umsetzung solcher Ausbauziele bietet dabei gegenüber Freiflächenanlagen die Vorteile geringeren Flächenverbrauchs, höherer gesellschaftlicher Akzeptanz und verbrauchsnahe Stromproduktion. BIPV-Lösungen können sowohl für Dachinstallationen als auch für fassadenintegrierte Anlagen eingesetzt werden, wobei technische, ökonomische, rechtliche und ästhetische Anforderungen zu berücksichtigen sind.

Notwendig für eine hohe Akzeptanz bei Planern, Bauherren und Gesellschaft ist eine weitere Verbesserung der architektonischen Integrier- und Gestaltbarkeit von BIPV – genauso übrigens, wie parallel auch von Building-attached photovoltaics (BAPV). Eine Zunahme der Bedeutung von BIPV setzt zudem die Entwicklung von der aktuellen Nische zum Massenmarkt voraus, um gleichzeitig die Kosten für ästhetisch hochwertige Lösungen zu senken.

Unterstützend ist es sinnvoll, das genaue BIPV-Potenzial in Flächen, elektrischen Leistungen und Stromerträgen zu quantifizieren sowie gebäudescharf räumlich aufzulösen und den entsprechenden Teilflächen der Gebäudehülle zuzuordnen. Nur so lassen sich die am besten geeigneten Flächen priorisieren, die mit BIPV erzielbaren Stromerträge maximieren, dadurch die Kosten senken und mehr Bauherren und Investoren zum Einsatz von BIPV in ihren Bauvorhaben motivieren. Gleichzeitig ist eine Gliederung und Gruppierung des BIPV-Potenzials nach Gebäudekategorien, der Ausrichtung der Potenzialflächen oder anderen Merkmalen im größeren Maßstab hilfreich, beispielsweise in der Politikberatung.

In Beantwortung der Frage nach dem detaillierten BIPV-Potenzial stellt die vorliegende Veröffentlichung eine rechnergestützte Methodik zur großflächigen, gebäudescharfen BIPV-Potenzialanalyse vor. In der Analyse werden die Gebäudegeometrien in LoD2 (LoD: Level of Detail), die lokalen klimatischen Bedingungen, die Einstrahlung auf jede Teilfläche eines Gebäudes unter Berücksichtigung von Verschattung durch Nachbargebäude sowie die technischen Charakteristika der BIPV-Systeme berücksichtigt. Im Unterschied zu

bestehenden Solarpotenzialanalysen, z. B. [4–6], werden nicht nur Dachflächen, sondern auch das Potenzial für Fassadensysteme ermittelt. Durch eine auf Strahlenganganalyse basierte Einstrahlungsberechnung können die konkreten Einstrahlungsbedingungen an allen Teilflächen der Gebäudehülle zudem genauer erfasst werden, als dies in bestehenden Solarkatastern üblich ist. Insbesondere der Einfluss von Verschattung wird in bestehenden Analysen in der Regel nur stark vereinfacht abgeschätzt. Die Praxistauglichkeit der Methodik wird anhand der Stadt Dresden als Anwendungsbeispiel demonstriert und deren konkrete Ergebnisse präsentiert.

Für einen deutschlandweiten Gebäudedatensatz im Detailgrad LoD1 liegen außerdem bereits Ergebnisse zu den Bruttoflächen, also den vollständigen Gebäudehüllflächen ohne Berücksichtigung von Ausschnitten oder Aufbauten sowie konkreter Dachform vor, auf deren Basis eine erste Abschätzung der deutschlandweiten BIPV-Potenziale getroffen wird.

## **Datengrundlage Gebäudegeometrien**

Als Grundlage für die Ermittlung der Potenzialflächen an Fassaden dient ein deutschlandweites 3D-Gebäudemodell im Level of Detail 1 (LoD1). Dieser Datenbestand enthält ca. 53 Mio. oberirdische Gebäude ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Dachform in Form eines Klötzchens mit Flachdach. Abgeleitet werden diese Klötzchen aus der Liegenschaftskarte und den Hauskoordinaten mit Höheninformationen, die durch Laserscanning ermittelt werden. Bei Ableitung der Gebäudegrundrisse aus der Liegenschaftskarte wird die Gebädefunktion mitgeführt, welche als Grundlage für die Ermittlung des Potenzials einer Gebäudekategorie dient. Weitere Merkmale sind ein Objektidentifikator, Qualitätsangaben (Metadaten), der Amtliche Gemeindeschlüssel (AGS) sowie die Koordinaten, die standardmäßig im Raumbezugssystem ETRS89/UTM abgegeben werden [7]. Mit dem neuen Datenangebot (LoD1/2) ist es möglich, von der 2D-Perspektive in die 3D-Perspektive zu wechseln. Stadtstrukturen und deren Gestaltung werden oftmals in der planaren Ebene dargestellt. Durch diese noch junge Form der Darstellung als 3D-Modell lassen sich nun das Stadtgefüge noch greifbarer darstellen und Bautypen bzw. deren Funktionen unterscheiden. Durch die Dreidimensionalität ist es auch möglich, das theoretische Fassadenflächenpotenzial erstmalig zu quantifizieren. Es sollten jedoch die bundeslandspezifischen Unterschiede bei der Ableitung der Gebäudehöhen bzw. der Bezüge beim Liegenschaftskataster (ALKIS/ALK) beachtet werden. Der hohe Qualitätsstandard der Lagegenauigkeit durch Liegenschaftskatasterableitung macht Detailanalysen möglich und lässt den Schluss zu, dass zurzeit kein besseres Geodatenprodukt für diesen Zweck verfügbar ist.

Eine detaillierte Potentialerhebung wird für die Stadt Dresden mittels 3D-Gebäudemodellen mit dem „Level of Detail 2“ (LoD2) durchgeführt. Dieser Datensatz beinhaltet zusätzlich standardisierte Dachformen entsprechend der tatsächlichen Firstverläufe [7].

Die LoD1-Daten bilden ein Gebäude in Form eines Klötzchens ab. Dies bedeutet, dass keinerlei Informationen zu Fassadenausschnitten, Auskragungen, Dachform und – aufbauten vorliegen. Je nach Bundesland wird außerdem der Bezugspunkt des Daches für eine vom Flachdach abweichende Form unterschiedlich gewählt. Differenziert wird hier die Höhe des Klötzchens auf die Traufhöhe, die Firsthöhe oder den Mittelwert zwischen den Höhen des Originalgebäudes. Daraus folgt, dass dasselbe Gebäude in verschiedenen Bundesländern zu unterschiedlichen Modellabbildungen führen kann, was die Interpretation der Daten erschwert. Im Bundesland Sachsen und somit für den LoD1-Datensatz von Dresden wird der Bezugspunkt Dach als Median angegeben.

Bedingt durch die Abbildung als Klötzchen wird außerdem die Dachfläche stets unterschätzt, wenn nicht auch im Original ein Flachdach vorliegt. Die Höhe der Vollgeschosse hingegen wird im Klötzchenmodell überschritten, sofern für das Klötzchen eine Höhe oberhalb der originalen Traufhöhe gewählt wird. Dies führt tendenziell zu einer Überschätzung der Fassadenfläche. Die Firsthöhe wird im Gegenzug in allen Fällen unterschätzt, in denen nicht die originale Firsthöhe, sondern ein niedrigerer Wert als Höhe des Klötzchens gewählt wird.

Der LoD2- Datensatz stellt die Gebäude derzeit mit den Standarddachformen Flachdach, Pultdach, Satteldach, Walmdach, Krüppelwalmdach, Mansardendach, Sheddach und Zeldach oder als Mischform dar. Aufbauten wie Gauben oder Schornsteine, Dachausschnitte, z. B. für Dachfenster, oder Auskragungen wie Dachüberstände sind jedoch auch in dieser Detaillierungsstufe noch nicht enthalten. Gleiches gilt für Informationen zur Fassadengestaltung.

Die Daten liegen im CityGML-Format vor, das als XML-basiertes, offenes Datenformat für die konsistente Beschreibung und Modellierung von 3D-Stadtmodellen verwendet wird und einen interoperablen 3D-Datenaustausch erlaubt.

## **Methodik**

Die Methodik besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Teilen. Im ersten Teil wird der Originalgeodatensatz für die Gebäude bereinigt und aufbereitet, bis ein möglichst fehlerfreier Datensatz für alle enthaltenen Objekte vorliegt. Nachfolgend werden die Dach- und Fassadenflächen für jedes der Objekte berechnet. Zusammen mit dem aufbereiteten 3D-Gebäudemodell gehen diese Angaben als Bruttoflächen in den zweiten Teil ein. In diesem ersten Teil werden außerdem ein Geländemodell und ein Modell des Stadtgrüns erstellt. Das genaue Vorgehen wird weiter unten näher beschrieben.

Im zweiten Teil dienen die Gebäudegeometrien als Eingangsdaten für ein Modell zur solaren Einstrahlungsberechnung. Mit dessen Hilfe werden aus den verfügbaren Bruttoflächen diejenigen ausgewählt, die aufgrund der Einstrahlungsverhältnisse für eine Photovoltaiknutzung attraktiv sind. Neben den Einstrahlungsbedingungen gibt es noch weitere Faktoren, die die tatsächlich nutzbaren Flächen reduzieren, bis eine für die PV-

Nutzung geeignete Nettofläche übrigbleibt. Auf Basis dieser Flächen und der dortigen solaren Einstrahlung werden dann die installierbaren elektrischen PV-Leistungen und die damit erzielbaren Jahreserträge an elektrischer Energie berechnet.

Der erste Teil der Methodik wird auf beide im Abschnitt Datengrundlage vorgestellten Datensätze angewandt. Der zweite Teil der Methodik ist noch in einem früheren Entwicklungsstadium mit einem geringeren Automatisierungsgrad. Er wird deshalb nur anhand der Stadt Dresden demonstriert. Für die Bruttoflächen aus dem deutschlandweiten Datensatz findet zusätzlich eine Überschlagsrechnung statt, deren Ergebnisse in Bezug zu den in der Einleitung dargestellten Anforderungen eines klimaneutralen Energiesystems gesetzt werden.

## Teil 1: Aufbereitung Geodatenmodell und Bruttoflächenberechnung

Zur Ermittlung des theoretischen Fassadenflächenpotenzials für Deutschland werden Verfahrensschritte und Berechnungsalgorithmen aus der Geoinformatik angewendet, die hier kurzgefasst dargestellt werden. Für eine detailliertere Verfahrensbeschreibung verweisen wir auf [8].

Zunächst werden die Grundrisse aus dem LoD-Datensatz extrahiert zur Beseitigung möglicher Fehlerquellen [9]. Hier wird die Gebäudenutzung an die Polygone geheftet um die Hauptnutzungskategorien zu ermitteln. Die Nutzungskategorien sind relevant für das Ermitteln für welchen Gebäudetyp eine standardisierte BIPV-Lösung sinnvoll erscheint. Um das Berechnungsverfahren zu beschleunigen werden die extrahierten Polygone generalisiert, da die Anzahl der Stützpunkte der Grundrisse maßgeblich mit der Rechenzeit korreliert. Die Polygone werden daraufhin in Liniensegmente geteilt, als Vorbereitung für die Berechnung der Fassadenflächen. Der nächste Schritt ist die Ermittlung freier Fassadensegmente um auszuschließen, dass Flächen sich berührender Hauswände in die Quantifizierung doppelt eingehen. Für die Fassadensegmente werden ebenfalls Orientierungsberechnungen durchgeführt und in 16 Richtungssektoren aufgeschlüsselt. Im Ergebnis liegen die aufbereiteten 3D-Gebäudegeometrien in LoD2 mit Angaben zu Größe aller Flächen im Format CityGML vor.

## Teil 2: Berechnung von Einstrahlungsverhältnissen, installierbaren elektrischen Leistungen und erzielbaren Jahresstromerträgen

Im zweiten Teil der Methodik werden die CityGML-Gebäudegeometrien mittels des Plug-In „3DCityEditor“ in die Software SketchUp importiert und über ein weiteres Plug-In, „Su2rad“, in das Radiance-Format konvertiert [10–12]. Bei der Formatkonvertierung wird die ursprüngliche Gruppierung der Flächen bzw. Polygone zu Objekten leider aufgelöst und in nicht miteinander verbundene Flächen überführt – was zu Mehraufwand führt und die spätere Auswertung im Objektzusammenhang aktuell noch erschwert.

Die Geometriedaten im Radiance-Format werden dann in der gleichnamigen Software für die Einstrahlungsberechnung einschließlich Verschattungsanalyse mittels Strahlengangverfolgung genutzt. Neben der Geometrie der Objekte benötigt Radiance bzw. die darauf aufbauende Software Fener noch weitere Eingangsdaten [13].

Eine wichtige Vorarbeit ist das Setzen von Sensorpunkten, also virtuellen Messstellen, die im rechten Winkel auf jeder Fläche positioniert werden und an denen die auftreffende Einstrahlung aus Direkt- und Diffusstrahlung für jeden Zeitschritt berechnet wird. Während das Setzen der Sensorpunkte bei Einzelgebäuden von Hand vorgenommen werden kann, ist dies bei großräumigen Berechnungen mit vielen Objekten nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurde ein automatisiertes Verfahren entwickelt, mit dem die Sensorpunktsetzung für alle Flächen in prinzipiell beliebiger Auflösung automatisiert erfolgt. Dazu werden die beliebig geformten Flächen zunächst per Triangulation in Dreiecke unterteilt. Jede dreieckige Teilfläche wird dann mit Sensorpunkten senkrecht zur Oberfläche belegt. Die Auflösung in Form eines rechtwinkligen Gitters kann in x- und y-Richtung getrennt vorgegeben werden. Als Mindestauflösung lässt sich außerdem ein Sensorpunkt im Zentrum jeder Fläche setzen. Je nach Flächenform kommen dabei zwei verschiedene Methoden zum Einsatz, um sicherzustellen, dass der Sensorpunkt innerhalb der Fläche liegt. Für nicht-konvexe Flächen wird „centroids“ genutzt, für konvexe „representative“ [14].

Für die Anwendungsbeispiele in diesem Artikel wird aktuell die Minimalauflösung von einem Sensorpunkt pro Fläche genutzt, um die Rechenzeiten gering zu halten. Da der räumliche Zusammenhang bei der Formatkonvertierung verloren gegangen ist, bei einer Wand also nicht mehr zwischen innen und außen unterschieden werden kann, entstehen auf jeder Fläche zwei gegenüberliegende, entgegengesetzt gerichtete Vektoren. Für die eigentliche Einstrahlungsberechnung sind aber nur die nach außen gerichteten Vektoren von Interesse, weshalb die nach innen oder unten gerichteten Sensoren vor der eigentlichen Einstrahlungsberechnung mit Hilfe der Ergebnisse eines grob aufgelösten Radiance-Durchlaufs entfernt werden.

Als weitere Parameter gehen der Ort und Daten zum Einstrahlungsverlauf in Form von Direkt- und Diffusstrahlung sowie der Reflexionsgrad jeder Oberfläche in die Radiance-Berechnungen ein. Für den hier vorliegenden Artikel werden die Berechnungen in stündlicher Auflösung für ein Jahr durchgeführt.

Im Gegensatz zu reinen Radiance-Berechnungen, also ausschließlicher Nutzung von Strahlengangverfolgung, kommt in diesem Artikel eine abgewandelte Methode zum Einsatz, die in der Software Fener implementiert ist [13]. Sie nutzt die Strahlengangverfolgung nur in einer Vorberechnungsphase in Form eines Backward-Raytracing zur Erstellung einer Helligkeitsmatrix für jeden Zeitschritt. Die nachfolgenden Einstrahlungsberechnungen für jeden Sensorpunkt greifen dann, ohne weitere Strahlengangverfolgung, auf diese Matrix zu. Die Methode bietet dadurch eine deutlich

höhere Rechengeschwindigkeit auf Kosten einer etwas geringeren Genauigkeit. Im Ergebnis liegt für jeden Sensorpunkt eine stündlich aufgelöste Zeitreihe der Globalstrahlung auf der entsprechenden Fläche als Summe aus Direktstrahlung, Diffusstrahlung vom Himmel sowie an Boden und benachbarten Objekten reflektierter Strahlung vor.

Im nächsten Schritt werden verschiedene Abschläge auf die Bruttoflächen vorgenommen. In der Annahme, dass sich sehr kleine Flächen technisch und/oder ökonomisch nicht für die Installation einer BIPV-Anlage eignen, werden zunächst alle Flächen ausgeschlossen, deren Größe unterhalb eines Schwellwertes liegt. Für diesen Artikel wurde eine Mindestfläche von 7 m<sup>2</sup>, entsprechend einer installierten elektrischen Leistung von etwa 1 kW<sub>p</sub> angesetzt.

Als Nächstes werden alle Flächen ausgeschlossen, auf denen die Jahressumme an solarer Einstrahlung unterhalb eines Schwellwertes von 500 kWh(m<sup>2</sup>a) liegt. Dieser Wert bildet eine pauschale Wirtschaftlichkeitsgrenze ab und kann für die individuelle Installation (deutlich) abweichen.

Des Weiteren zu bedenken ist, dass die Ausgangsdaten lediglich im Detailgrad LoD1 oder LoD2 verfügbar sind und somit keinerlei Information über Fassadenausschnitte, Auskragungen oder Dachaufbauten enthalten, die zum einen die tatsächlich sinnvoll nutzbare Fläche verringern und zum anderen auch erhebliche weitere Verschattung mit sich bringen können. Zum aktuellen Zeitpunkt werden diese Aspekte in Form einfacher Abschlagsfaktoren berücksichtigt.

Für Dächer werden über zwei Faktoren direkt aufgrund von Aufbauten nicht nutzbare Bereiche ausgeschlossen sowie weitere Bereiche, in denen die Aufbauten für eine zu starke Verschattung sorgen:  $r_{Dachfläche \text{ o. } Aufbauten} = 0,6$  und

$r_{Dachfläche \text{ unverschattet von Aufbauten}} = 0,9$ .

Bei Fassaden werden eingeschossige Gebäude per Abschlag ausgeschlossen, da bei diesen die Wahrscheinlichkeit auf Verschattung der Fassade durch Bäume und Buschwerk recht hoch ist:  $r_{mehrgeschossige \text{ Gebäude}} = 0,8$ . Ein Datensatz des Stadtgrüns als Basis für eine realitätsnahe Berücksichtigung der Verschattung durch Bäume liegt aus dem ersten Teil der Methodik bereits vor, ist jedoch noch nicht in den zweiten Teil integriert. Für die mehrgeschossigen Gebäude wird daher ein pauschaler Abschlagsfaktor eingeführt:  $r_{Fassadenfläche \text{ unverschattet von Bäumen}} = 0,9$ .

Ein weiterer Faktor berücksichtigt Fenster- und Türausschnitte. Für Wohn- und Bürogebäude liegt der Fensterflächenanteil typischerweise bei 20-30% der Fassadenfläche. Es werden daher 70% als nutzbare Fassadenfläche angesetzt:

$r_{Fassade \text{ o. } Ausschnitte} = 0,7$ .

Hinzu kommt ein genereller Belegungsgrad, der berücksichtigt, dass eine Potenzialfläche in der Praxis in der Regel nicht vollständig mit BIPV-Modulen belegt werden kann, sondern Modulabstände und aufgrund der Modulgröße nicht nutzbare Anteile, z. B. an den Rändern, die effektiv nutzbare Fläche schmälern:  $r_{\text{Belegungsgrad}} = 0,9$ . Dieser Abschlagsfaktor wird sowohl auf die verbleibenden Dach- als auch auf die Fassadenflächen angewandt.

Im Ergebnis reduzieren sich die nach Flächen- und Einstrahlungsuntergrenze verbliebenen Bruttoflächen an Dächern damit um den Faktor

$$\begin{aligned} r_{\text{Nettofläche,Dach}} &= r_{\text{Dachfläche o. Aufbauten}} \cdot r_{\text{Dachfläche unverschattet von Aufbauten}} \\ &= 0,6 \cdot 0,9 = 0,54 \end{aligned}$$

auf die nutzbare Nettofläche. Die BIPV-Modulfläche  $A_{\text{Modul}}$  ergibt sich daraus als

$$r_{\text{Modulfläche,Dach}} = r_{\text{Nettofläche,Dach}} \cdot r_{\text{Belegungsgrad}} = 0,54 \cdot 0,9 = 0,486$$

Für die Fassaden entspricht die Nettofläche der Bruttofläche mal dem Faktor:

$$\begin{aligned} r_{\text{Nettofläche,Fassade}} &= r_{\text{mehrgeschossige Gebäude}} \cdot r_{\text{Fassadenfläche unverschattet von Bäumen}} \\ &\quad \cdot r_{\text{Fassade o. Ausschnitte}} \\ &= 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 0,448 \end{aligned}$$

Als BIPV-Modulfläche  $A_{\text{Modul}}$  verbleibt dann ein Anteil von

$$r_{\text{Modulfläche,Fassade}} = r_{\text{Nettofläche,Fassade}} \cdot r_{\text{Belegungsgrad}} = 0,448 \cdot 0,9 = 0,4032$$

an der Bruttofläche.

Ergänzt um technische Daten zu leistungsbezogenem Flächenbedarf und der Effizienz von Photovoltaikanlagen liegen nun alle Eingangsdaten für eine Berechnung der installierbaren elektrischen BIPV-Leistung auf den Flächen sowie den zu erwartenden jährlichen elektrischen Energieerträgen vor. Genutzt wird dazu ein sehr einfaches Ertragsmodell, in das lediglich ein elektrischer Wirkungsgrad für die BIPV-Module bei Auslegungsbedingungen,  $\eta_{el,STC} = 0,18$ , sowie ein mittlerer jährlicher Wirkungsgrad für die restliche Installation in Form einer Performance Ratio,  $PR = 0,8$ , eingehen. Es wird davon ausgegangen, dass sich eine Performance Ratio von 80% für alle verbleibenden Flächen technisch realisieren lässt.

Die installierbare elektrische Leistung  $P_{el,BIPV,Sensorpunkt}$  der BIPV-Anlage auf einer zu einem Sensorpunkt gehörenden Fläche  $A_{\text{Modul,Sensorpunkt}}$  ergibt sich damit zu

$$P_{el,BIPV,Sensorpunkt} = A_{\text{Modul,Sensorpunkt}} \cdot \eta_{el,STC} \cdot 1000 \frac{W}{m^2}$$

und der erzielbare elektrische Jahresenergieertrag  $W_{el,BIPV,Sensorpunkt}$  entspricht

$$W_{el,BIPV,Sensorpunkt} = A_{\text{Modul,Sensorpunkt}} \cdot \sum_t I_{rr,Sensorpunkt}(t) \cdot \eta_{el,STC} \cdot PR$$

mit  $I_{rr,Sensorpunkt}(t)$ : Resultierende Globalstrahlung auf einen Sensorpunkt im Zeitschritt  $t$ .  
Über den Quotient der beiden Größen lässt sich als Kenngröße noch die jährliche Volllaststundenzahl  $t_{Voll}$  berechnen

$$t_{Voll} = \frac{W_{el,BIPV,Sensorpunkt}}{P_{el,BIPV,Sensorpunkt}}$$

Bei Bedarf ließe sich dieses einfache PV-Modell leicht gegen eine genauere Variante, wie z. B. [15] oder einen I-V-Kurven-basierten Ansatz, ersetzen. Für den Anwendungsfall einer großflächigen Potenzialanalyse liegen in der Regel jedoch gar nicht alle für detailliertere Ertragsmodelle benötigten Eingangsdaten vor, so dass deren Einsatz auch keine genaueren Ergebnisse verspricht.

Mit diesen Berechnungen liegen nun Ergebnisse für die Größe jeder Dach- oder Fassadenfläche, deren Orientierung in Azimut und Neigung, die auf die Fläche auftreffende solare Einstrahlung im Zeitverlauf, die dort installierbare elektrische BIPV-Leistung, die damit erzielbaren elektrischen Jahresenergieerträge und die resultierenden jährlichen Volllaststunden vor.

Anhand der im vorhandenen Eingangsdatensatz vorhandenen Metainformation lassen sich die Ergebnisse außerdem nach weiteren Kriterien filtern. Dies sind insbesondere die Orientierung nach Himmelsrichtung, der Gebäudekategorie, der Nutzungsart und natürlich der räumlichen Lage. Eine diesbezügliche Auswertung der Ergebnisse aus dem zweiten Methodikteil ist für die hier gezeigten Anwendungsbeispiele allerdings noch nicht erfolgt, weil die Metainformationen bei der Formatkonvertierung bisher verloren gehen.

## Ergebnisse und Diskussion

Die vorgestellte Methodik wird nun auf die beiden bereits genannten Beispiele eines LoD2-Datensatzes für die Stadt Dresden und eines bundesweiten LoD1-Geodatensatzes angewandt.

### Anwendungsbeispiel Dresden

Der LoD2-Datensatz der Stadt Dresden enthält insgesamt 135.583 Gebäude. Nach Bereinigung und Aufbereitung des Rohdatensatzes in Teil 1 der Methodik ergeben sich eine Bruttodachfläche von 22,73 km<sup>2</sup> und eine Bruttofassadenfläche von 52,90 km<sup>2</sup>. In Summe folgt daraus eine Bruttopotenzialfläche von 75,63 km<sup>2</sup>.

Da das Stadtgebiet auch im deutschlandweiten LoD1-Datensatz enthalten ist, lässt sich ein Vergleich mit dem dortigen Detaillierungsgrad anstellen. Es ist allerdings zu bedenken, dass der LoD1-Datensatz von 2016 stammt, während die LoD2-Daten für das Jahr 2018 vorliegen. Aus dem LoD1-Datensatz resultieren eine Bruttodachfläche von 20,30 km<sup>2</sup> (-11%), eine Bruttofassadenfläche von 51,74 km<sup>2</sup> (-2%) und eine Bruttogesamtfläche von

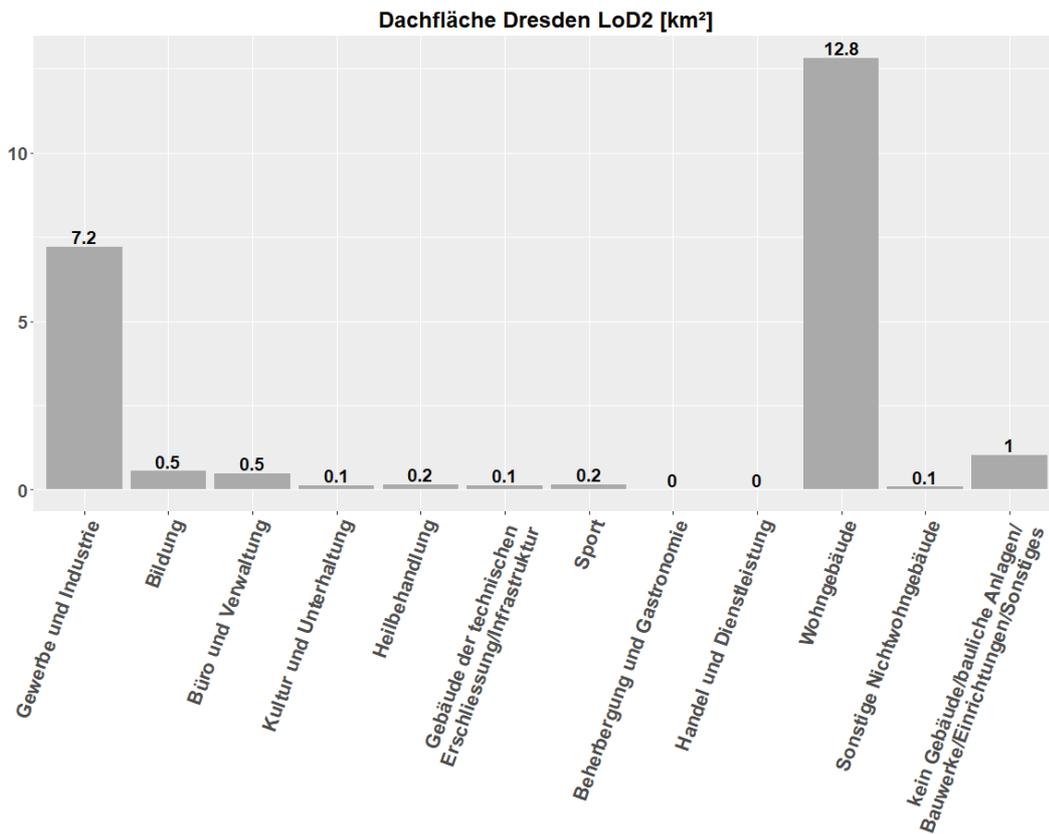


Abbildung 3: Verteilung der theoretischen Dachfläche nach der Gebäudenutzungstypologie (Quelle: eigene Berechnungen)

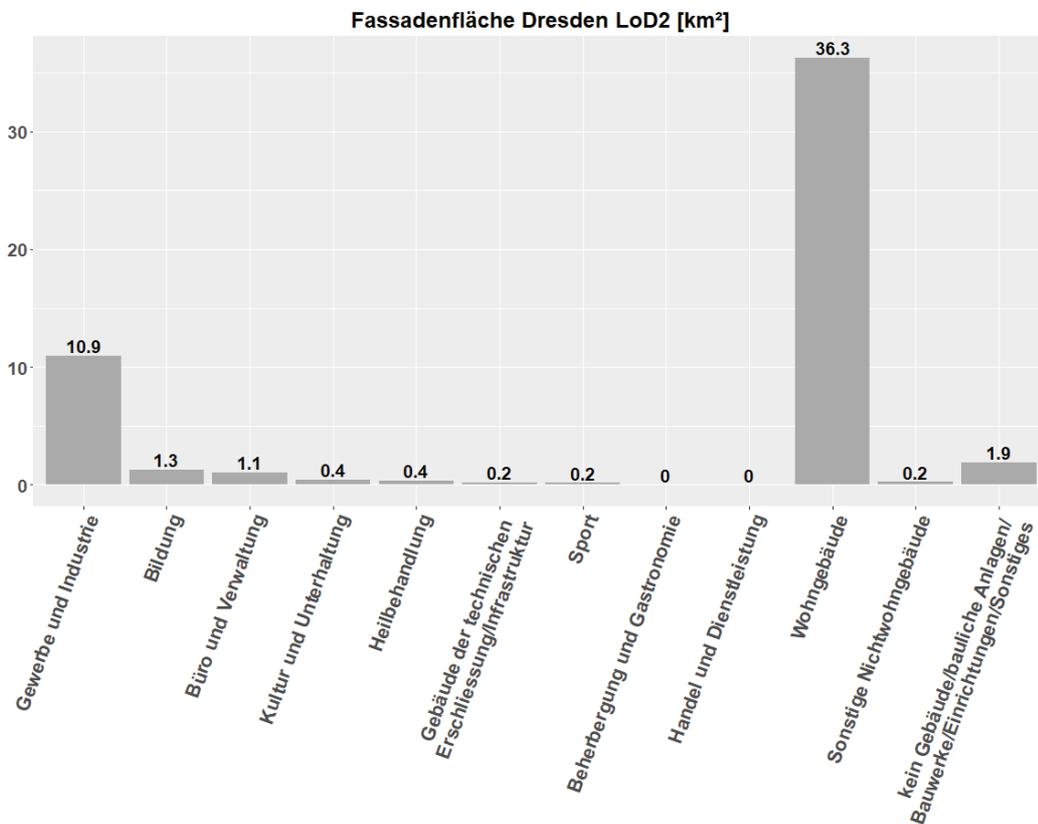


Abbildung 4: Verteilung der theoretischen Fassadenfläche nach der Gebäudenutzungstypologie (Quelle: eigene Berechnungen)

72,04 km<sup>2</sup> (-5%). Die Prozentangaben in Klammern geben die Abweichung zum LoD2-Datensatz an.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Abweichung im Detailgrad zwischen LoD1 und LoD2 für den vorliegenden Anwendungsfall zu keinen grundlegend veränderten Aussagen führt. Damit erscheinen auch die Kernaussagen des zweiten Anwendungsbeispiels hinreichend belastbar.

Die Verteilung der Bruttodach- und -fassadenflächen aus dem LoD2-Modell auf die Hauptnutzungskategorien ist in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt. Es wird deutlich, dass Wohngebäude mit 12,8 km<sup>2</sup> Bruttodachfläche und 36.3 km<sup>2</sup> Bruttofassadenfläche, entsprechend 56% bzw. 69%, den größten Anteil an den Gesamtdach- bzw. -fassadenflächen haben. An zweiter Stelle folgen Gewerbe- und Industriebauten mit 7,2 km<sup>2</sup> (32%) Bruttodach- und 10,9 km<sup>2</sup> (21%) Bruttofassadenfläche. Auf die übrigen Nutzungskategorien entfallen damit lediglich noch rund 12% der Bruttodach- und 10% der Bruttofassadenfläche.

Wie in Teil 2 der Methodik beschrieben, sind von den genannten Bruttoflächen allerdings größere Teile nicht für eine BIPV-Nutzung verfügbar oder technisch und ökonomisch unattraktiv. Abbildung 5 zeigt die Gesamtbruttoflächen (gelb) als Summe von Bruttodach- und -fassadenflächen sowie die verbleibenden Gesamtflächen nach Ansatz der Untergrenzen für die Mindestflächengröße von 7 m<sup>2</sup> (blau) bzw. zusätzlich der Mindesteinstrahlungssumme von 500 kWh/(m<sup>2</sup>a) (rot) im Vergleich. Die Darstellung erfolgt nach Kachelgruppen aufgelöst. Dazu wurden die in räumlich zusammenhängenden Kacheln gegliederten Gebäudegeometrien des Eingangsdatensatzes aus rechentechnischen Gründen zu Kachelgruppen zusammengefasst, wobei nicht zwingend benachbarte Kacheln gruppiert wurden.

Inhaltlich wird ersichtlich, dass die Flächenuntergrenze kaum Auswirkungen auf die verfügbare Fläche hat. Über alle Kachelgruppen hinweg sind es weniger als 1,5% der Gesamtbruttofläche, die dadurch ausgeschlossen werden. Die Anwendung der Einstrahlungsuntergrenze hingegen hat deutliche Auswirkungen. Hier sind es, im Mittel über alle Kachelgruppen, fast 42% der Gesamtbruttofläche, die abgezogen werden.

Ein Blick auf die Abbildungen Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigt dieselbe Auswertung getrennt nach Dach- und Fassadenflächen. Es ist zu sehen, dass die Flächenuntergrenze für die Dächer noch etwas geringere Auswirkungen hat als für die Fassaden. Insbesondere aber wird deutlich, dass sich die Einstrahlungsuntergrenze erwartungsgemäß vor allem auf die Fassadenflächen auswirkt. Während die Höhe des roten Balkens in Abbildung 6 nur unwesentlich von der des blauen Balkens abweicht (-2% im Mittel), gehen in der Fassade im Mittel mehr als 50% der Bruttofläche verloren. Dies ist ausschließlich der Verschattung durch Nachbargebäude geschuldet. Der Einfluss von Vegetation ist noch nicht berücksichtigt.

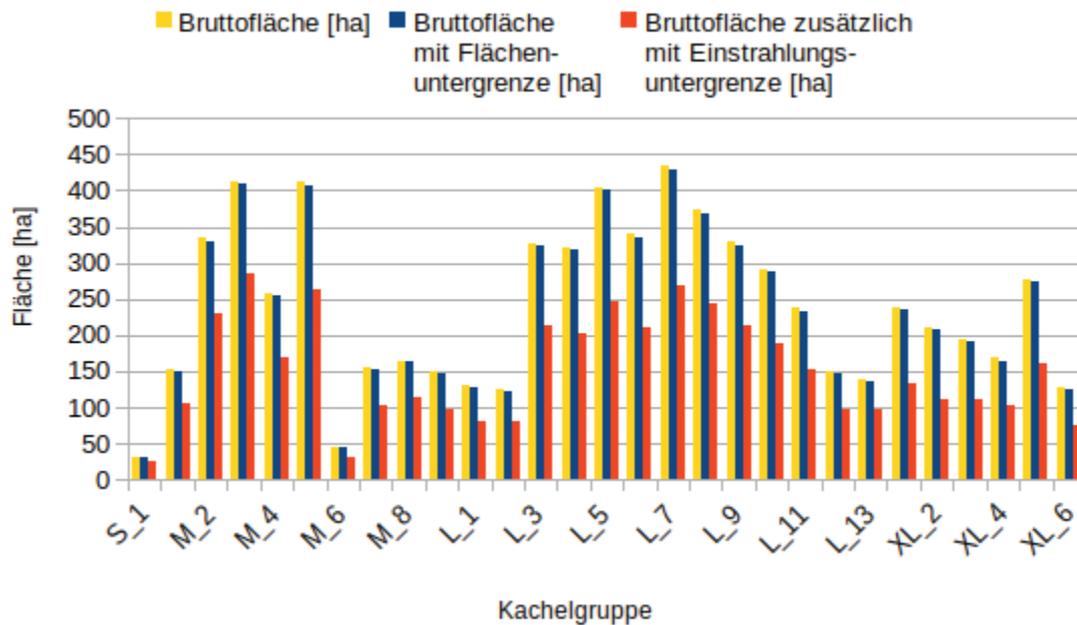


Abbildung 5: Bruttoflächen an Dächern und Fassaden in räumlicher Auflösung (Kacheln) mit und ohne Untergrenzen für Flächengröße und Jahressumme an solarer Einstrahlung für das Anwendungsbeispiel Dresden

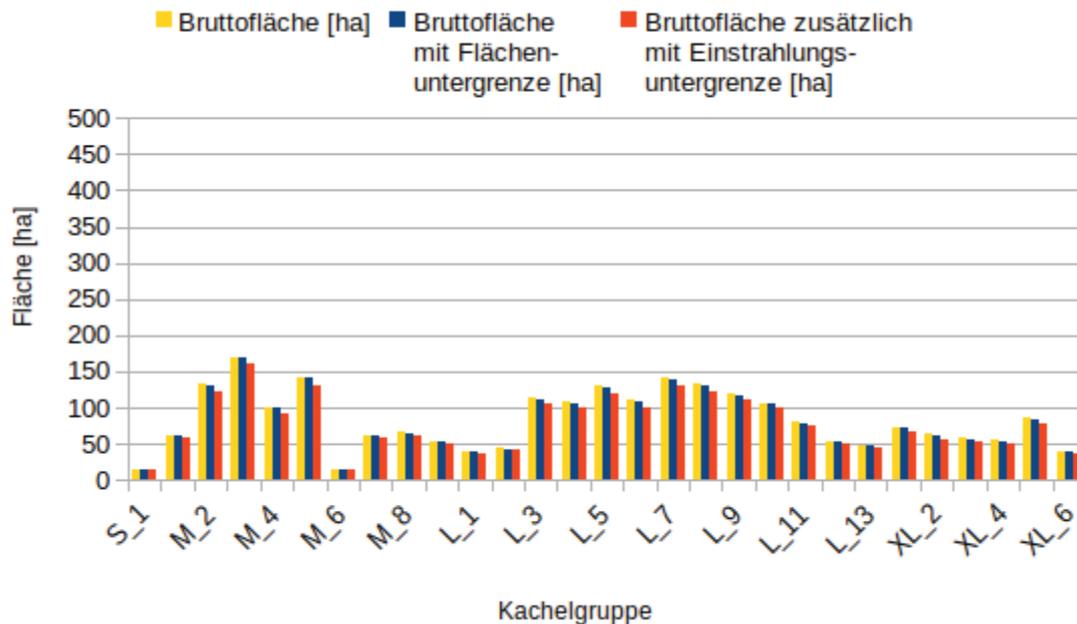


Abbildung 6: Bruttoflächen an Dächern in räumlicher Auflösung (Kacheln) mit und ohne Untergrenzen für Flächengröße und Jahressumme an solarer Einstrahlung für das Anwendungsbeispiel Dresden

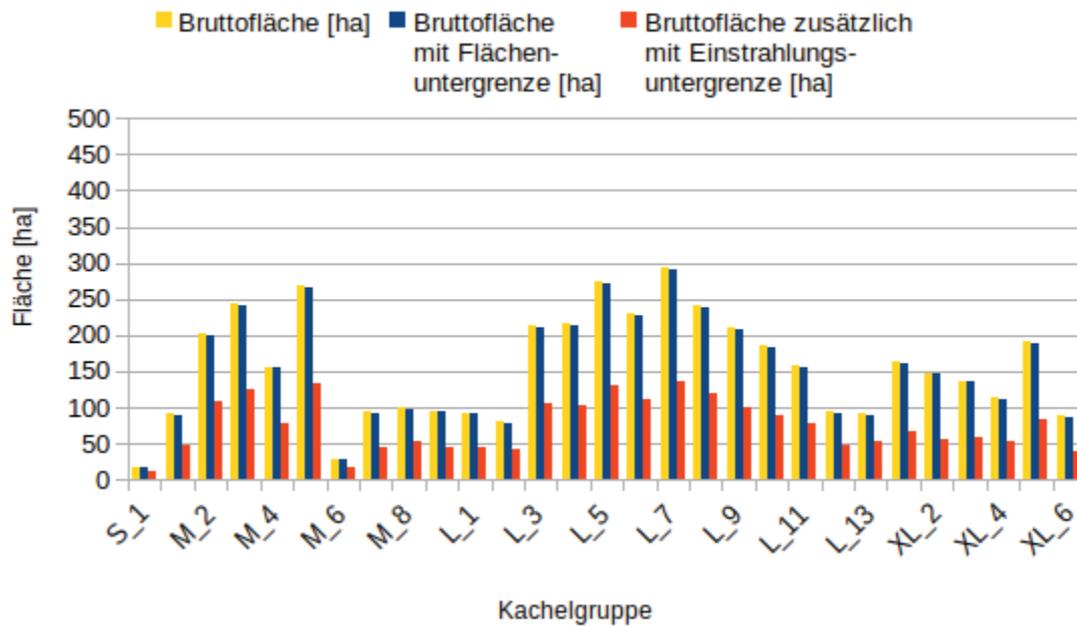


Abbildung 7: Bruttoflächen an Fassaden in räumlicher Auflösung (Kacheln) mit und ohne Untergrenzen für Flächengröße und Jahressumme an solarer Einstrahlung für das Anwendungsbeispiel Dresden

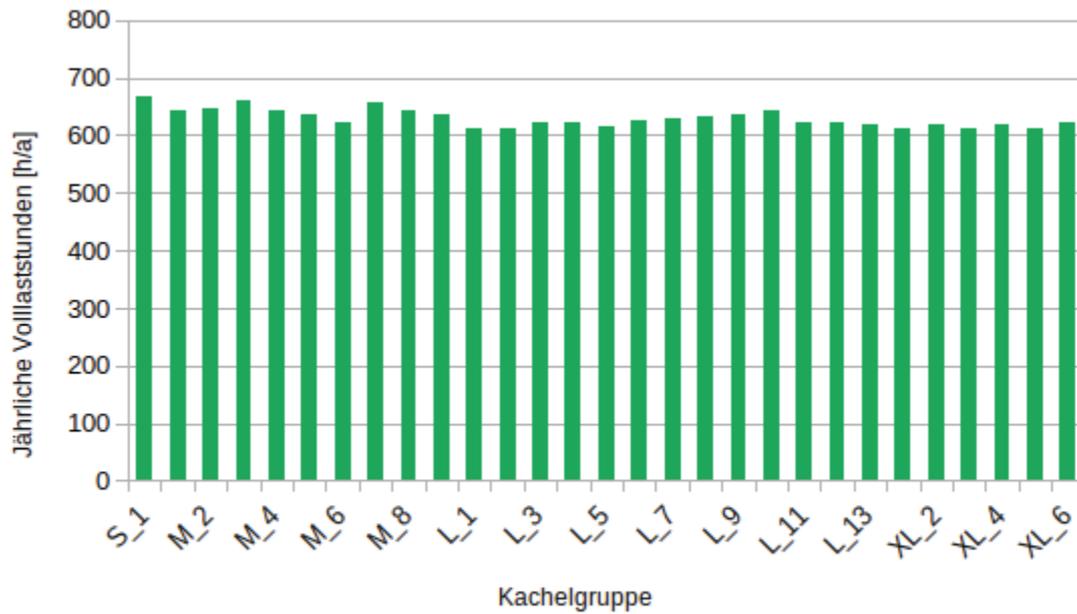


Abbildung 8: Jährliche Volllaststundenzahl für die Dach- und Fassadenanlagen in Dresden in räumlicher Auflösung (Kacheln)

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der BIPV-Potenzialanalyse für das Anwendungsbeispiel Dresden

	Dächer und Fassaden	Dächer	Fassaden
Bruttofläche LoD1 2016 [km <sup>2</sup> ]	72,04	20,30	51,74
Bruttofläche LoD2 2018 [km <sup>2</sup> ]	75,63	22,73	52,90
Bruttofläche mit Flächenuntergrenze und Einstrahlungsuntergrenze [km <sup>2</sup> ]	44,08	22,37	21,71
Nettofläche [km <sup>2</sup> ]	23,05	12,08	10,97
BIPV-Modulfläche [km <sup>2</sup> ]	20,74	10,87	9,87
Installierbare elektr. BIPV-Leistung [MW <sub>p</sub> ]	7.140	3.624	3.517
Möglicher Jahresertrag an el. Energie [GWh/a]	4.506	2.660	1.846
Mittlere jährliche Vollaststunden [h/a]	631	734	525

Nach Ansatz der Abschläge hierfür und für die übrigen Minderungseffekte aus dem Abschnitt „Methodik“ verbleiben über alle Kachelgruppen hinweg 12,08 km<sup>2</sup> als Nettodachfläche, 10,97 km<sup>2</sup> als Nettofassadenfläche und 23,05 km<sup>2</sup> als Nettogesamtfläche für die BIPV-Nutzung. Bezogen auf die Bruttofläche entspricht dies Anteilen rund 31% für die Gesamtfläche, 53% für die Dachflächen und 21% für die Fassadenflächen.

Für die Gesamtfläche resultieren hieraus eine Modulfläche von 20,74 km<sup>2</sup> und eine installierbare elektrische BIPV-Leistung von 7.140 MW<sub>p</sub>, die sich auf 10,87 km<sup>2</sup> bzw. 3.624 MW<sub>p</sub> für die Dächer und 9,87 km<sup>2</sup> bzw. 3.517 MW<sub>p</sub> für die Fassaden aufteilen. Der elektrische Jahresenergieertrag ergibt sich zu 4.506 GWh/a für die Gesamtmodulfläche mit 2.660 GWh/a aus Dachanlagen und 1.846 GWh/a aus Fassadenanlagen. Die mittlere Vollaststundenzahl über alle Kachelgruppen hinweg sowie Dach- und Fassadenanlagen zusammen liegt bei 631 h/a. Während sie über die verschiedenen Kachelgruppen kaum variiert (Abbildung 8), ergibt sich ein deutlicher Unterschied von im Mittel 734 h/a für die Dachanlagen gegenüber 525 h/a für die Fassadenanlagen. Tabelle 1 und Abbildung 9 fassen diese Ergebnisse noch einmal zusammen.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sollen diese am Strombedarf Dresdens gespiegelt werden. In ihrem Integrierten Klimaschutzkonzept aus dem Jahr 2013 gibt die Stadt Dresden ihren Jahresbedarf an elektrischer Energie für 2010 mit 2.526 GWh/a (s. [16] S. 22). Das errechnete BIPV-Ertragspotenzial übersteigt diesen Bedarf um einen Faktor von rund 1,8. Selbst in der Erwartung, dass der Strombedarf seit 2010 gestiegen ist, reicht also das BIPV-Potenzial wahrscheinlich aus, um Dresdens gesamten Bedarf an elektrischer Energie in der Jahresbilanz zu decken. Für die Umsetzbarkeit der Energiewende auch auf einer lokalen Ebene ist dies eine wichtige Erkenntnis.

Für eine praktische Anwendung spielen natürlich noch weitere Aspekte eine wichtige Rolle. So muss der Energiebedarf nicht nur in Jahressumme, sondern zu jedem Zeitpunkt

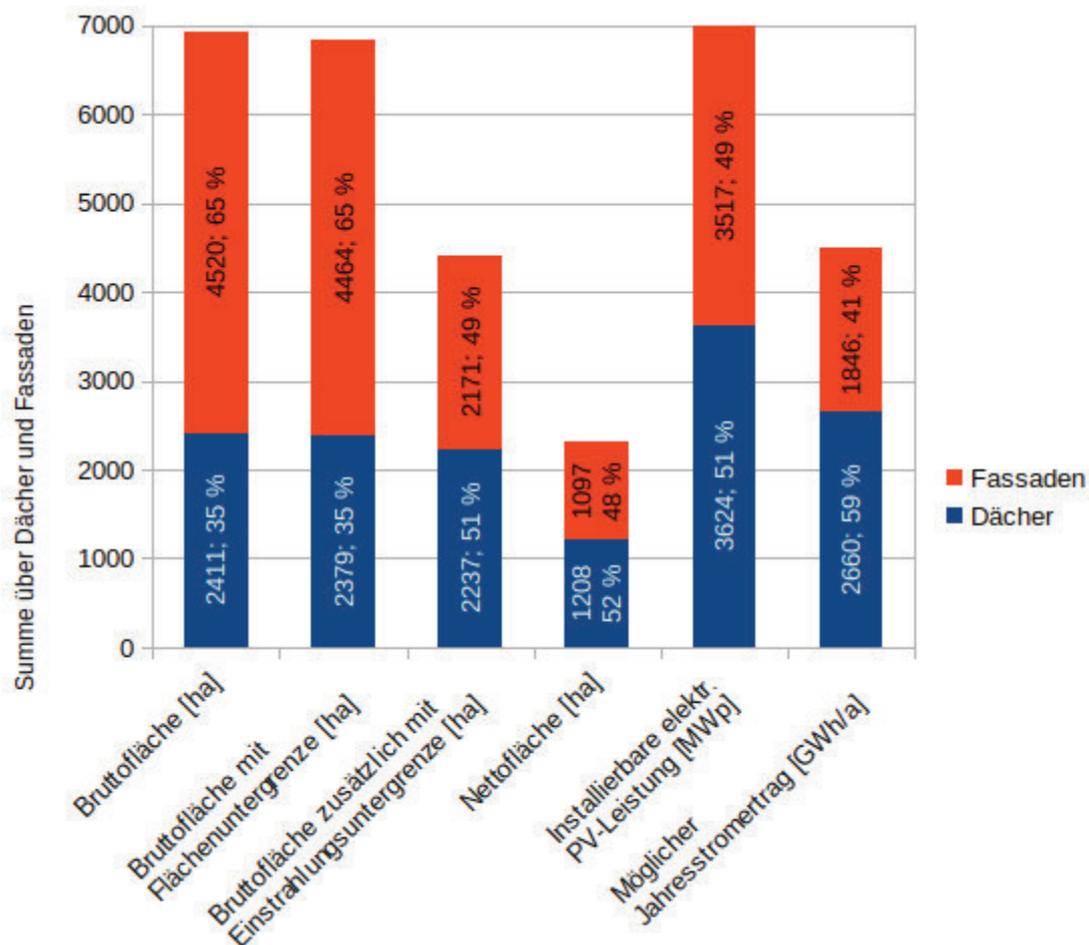


Abbildung 9: Zusammenfassung der Ergebnisse der BIPV-Potenzialanalyse für Dresden

gedeckt werden. Die Abschätzungen sind in vielen Punkten zudem noch grob und enthalten auch noch keine wirtschaftliche Betrachtung. Ein vorhandenes Potenzial muss auch gehoben werden, was, selbst bei gegebener Wirtschaftlichkeit, Anforderungen an die Verfügbarkeit von Kapital, Arbeitskraft und, nicht zu vergessen, Akzeptanz in der Bevölkerung stellt. Unbesehen davon, zeigt die Erhebung den möglichen Beitrag von BIPV zur lokalen Umsetzung der Energiewende auf.

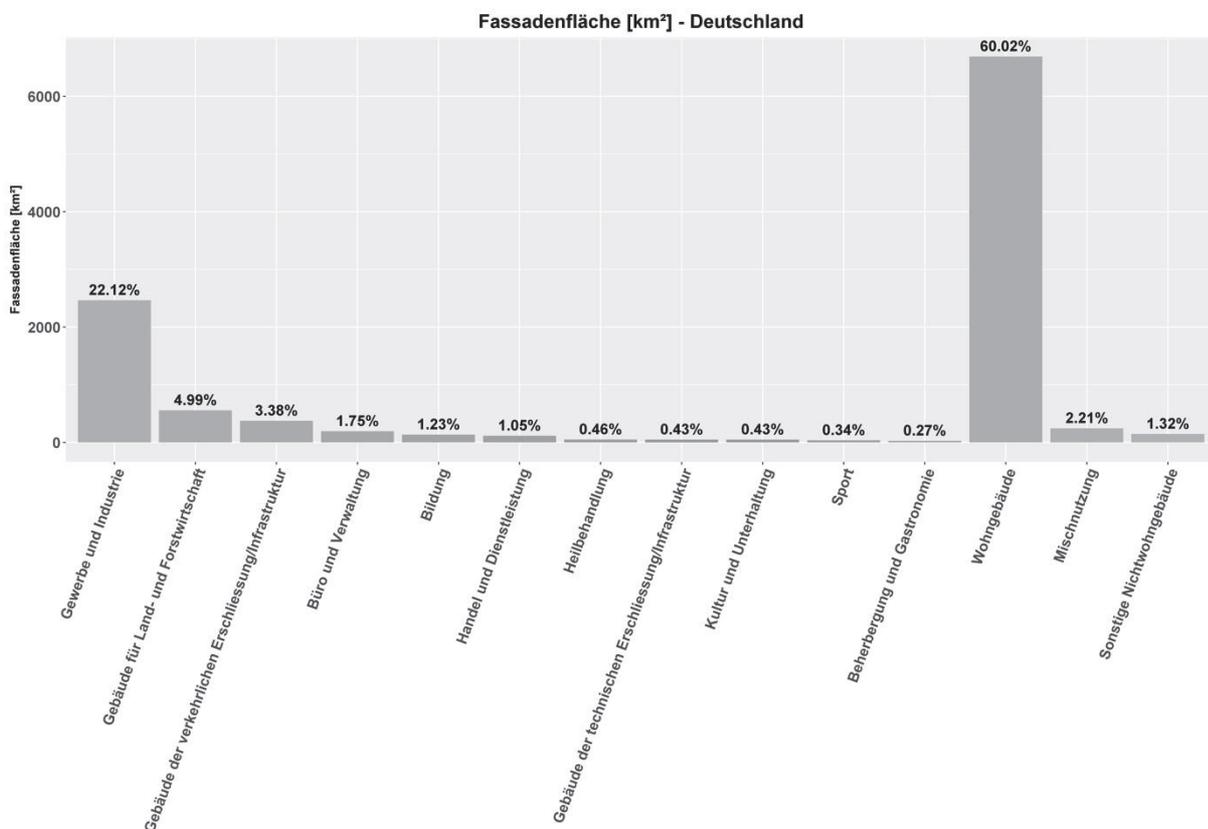
### Anwendungsbeispiel Deutschland

Für den deutschlandweiten Gebäudedatensatz ergibt sich aus dem ersten Teil der Methodik eine bebaute Fläche von 49.000 km<sup>2</sup>, von der 24.400 km<sup>2</sup> mit Gebäuden oder Freifläche belegt sind. Als Bruttodachfläche der Gebäude wird ein Wert von rund 6.101 km<sup>2</sup> berechnet und die Bruttofassadenfläche beträgt etwa 12.416 km<sup>2</sup> (Tabelle 2). Aufgrund der LoD1-Abbildung als Klötzchen entspricht die Bruttodachfläche der Grundfläche der Gebäude.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen für Dresden zeigt für Deutschland ein fast identisches Verhältnis von Dach- zu Fassadenfläche von etwa 1:2. Dies ist insofern interessant, als

**Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der BIPV-Potenzialanalyse für das Anwendungsbeispiel Deutschland**

	Dächer und Fassaden	Dächer	Fassaden
Bruttofläche LoD1 2016 [km <sup>2</sup> ] [8]	18.517	6.101	12.416
Nettofläche [km <sup>2</sup> ]	5.700	3.200	2.500
BIPV-Modulfläche [km <sup>2</sup> ]	5.000	2.800	2.200
Installierbare elektr. BIPV-Leistung [GW <sub>p</sub> ]	900	504	396
Annahmen zu mittleren jährlichen Vollaststunden [h/a]	824	1000	600
Möglicher Jahresertrag an el. Energie [TWh/a]	742	504	238



**Abbildung 10: Aufteilung der Bruttofassadenflächen für das Anwendungsbeispiel Deutschland nach Hauptnutzungskategorie [8]**

ein- und zweigeschossige Gebäude ein geringeres Fassaden- zu Dachflächenverhältnis als höhere Gebäude haben und die Gebäudestruktur für eine dichtbesiedelte Großstadt wie Dresden mit vielen mehrgeschossigen Gebäuden merklich von der bundesweiten Struktur mit seinen auch ländlichen Gebieten und größerem Anteil ein- und zweigeschossiger Gebäude abweicht.

Abbildung 10 zeigt die Verteilung der Bruttofassadenflächen auf die Hauptnutzungskategorien. Hier stechen vor allem zwei Kategorien heraus, nämlich Wohngebäude mit einem Fassadenflächenanteil von rund 60% sowie Gewerbe- und Industriebauten mit einem Anteil von mehr als 22%. Alle übrigen Kategorien haben lediglich Anteile von je unter 5%. Wiederum ergibt sich damit interessanterweise ein ähnliches Bild wie bei Dresden.

Auch wenn aus der Verteilung folgt, dass Fassaden-BIPV-Systeme für die beiden Nutzungskategorien Wohngebäude sowie Gewerbe- und Industriebauten ein besonders großes Flächenpotenzial haben, müssen insbesondere Wohngebäude mit oft hohem Kostendruck nicht den anfangs ökonomisch am sinnvollsten zu erschließenden Markt darstellen. Fassaden von Gewerbe- und Industriebauten einschließlich Bürogebäuden lassen sich tendenziell leichter nutzen, weil sie oft homogener sind und Bürogebäude häufig auch repräsentativer gestaltet werden. Wohngebäude hingegen sind oftmals sehr individuell und durch die Fenster und Türanteile in der Regel nicht mit großen, zusammenhängenden Flächen versehen.

Ausgehend von diesen Bruttoflächenangaben werden in einem stark vereinfachten zweiten Methodikteil Abschläge zur Abschätzung der Nettofläche angesetzt. Aufgrund der Ähnlichkeiten mit den Dresdener Ergebnissen bezüglich der Flächenverhältnisse werden die dortigen die Verhältnisse von Netto- zu Bruttofläche als Faktoren übernommen. Wegen der großen Unsicherheit wird großzügig nach abgerundet.

Es ergeben sich Nettodachflächen von rund 3.200 km<sup>2</sup>, Nettofassadenflächen von rund 2.500 km<sup>2</sup> und eine Gesamtnettofläche von 5.700 km<sup>2</sup>. Als BIPV-Modulfläche lassen sich damit überschlägig 2.800 km<sup>2</sup> an Dächern und 2.200 km<sup>2</sup> an Fassaden nutzen. Insgesamt sind es 5.000 km<sup>2</sup>.

Diese Flächen entsprechen einer installierbaren elektrischen BIPV-Leistung von etwa 900 GW<sub>p</sub> insgesamt, aufgeteilt auf rund 500 GW<sub>p</sub> an Dächern und 400 GW<sub>p</sub> an Fassaden. In der Annahme einer Volllaststundenzahl von 1.000 h/a für Dachanlagen analog zu den Berechnungen in der eingangs vorgestellten Studie [1] und 600 h/a für Fassadenanlagen lässt sich so ein jährlicher elektrischer Energieertrag von etwa 742 TWh/a insgesamt erzielen, von denen rund 504 TWh/a aus Dachanlagen und 238 TWh aus Fassadenanlagen stammen.

Verglichen mit den Anforderungen aus der einleitend erwähnten Studie zu einem klimaneutralen Energiesystem lassen sich die dortigen Annahmen hinsichtlich der Photovoltaik bestätigen und die Ergebnisse in ihrer technischen Umsetzbarkeit stützen. So wird das in den meisten Szenariendefinitionen in Abbildung 1 angesetzte PV-Potenzial von 387 GW<sub>p</sub> für Aufdachanlagen um 30% überschritten. Lediglich im Szenario „Inakzeptanz“ wird mit 610 GW<sub>p</sub> ein Wert angesetzt, der das ermittelte Dachpotenzial um 21% übersteigt. Dafür bleibt in der Studie das Potenzial an Fassadenanlagen

unberücksichtigt. Die im Ergebnis auf Dächern installierten elektrischen PV-Leistungen liegen in der Studie mit maximal 460 GW<sub>p</sub> (Szenario „Inakzeptanz“) in jedem Fall unterhalb des ermittelten BIPV-Potenzials.

## Fazit und Ausblick

Der vorliegende Artikel stellt eine zweistufige Methodik zur gebäudescharfen Erhebung des bauwerksbezogenen Photovoltaikpotenzials an Dächern und Fassaden vor. Die Methodik wird dann auf zwei Anwendungsfälle, die Stadt Dresden und Deutschland, angewandt.

Die Methodenentwicklung für die erste Stufe, die Analyse von Bruttoflächen aus 3D-Gebäudegeometrien ist dabei hinsichtlich Detail- und Automatisierungsgrad bereits weit fortgeschritten. In der zweiten Stufe sind demgegenüber noch einige starke Vereinfachungen nötig. Dies gilt für den bereits recht detailliert analysierten Anwendungsfall Dresden, aber in noch stärkerem Maße für die deutschlandweite Anwendung.

Trotz aller Unsicherheiten und Vereinfachungen zeigen die Ergebnisse bereits jetzt das Potenzial der BIPV- und BAPV-Nutzung und den möglichen Beitrag zu einem zukünftigen klimaneutralen Energiesystem. Dies gilt für die Energieversorgung Deutschlands ebenso wie auf der lokalen Ebene, was der konkreten Umsetzung vor Ort Möglichkeiten eröffnet.

Als nächste Schritte stehen vor allem die Verbesserung des Detaillierungsgrades und der Analysegenauigkeit hinsichtlich der Berücksichtigung von Geländeprofil und Stadtgrün, der Auswertung nach weiteren Metainformationen sowie eine weitere Automatisierung an.

## Förderhinweis

Die Methodenentwicklung und die Ergebnisse wurden im Rahmen des Förderprojektes „Standard-BIPV“, Förderkennzeichen 0324063, vom BMWi gefördert.

## Literaturverzeichnis

- [1] STERCHELE, Philip ; BRANDES, Julian ; HEILIG, Judith ; WREDE, Daniel ; KOST, Christoph ; SCHLEGL, Thomas ; BETT, Andreas ; HENNING, Hans-Martin: *WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM : Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen*. Freiburg, 02.2020
- [2] HENNING, H.-M. ; PALZER, A.: *WAS KOSTET DIE ENERGIEWENDE? : Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050*. Freiburg, 2015
- [3] ACATECH – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN E. V.: *Sektorkopplung - Optionen für die nächste Phase der Energiewende*. München : acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2017 (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung)

- [4] LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG: *Energieatlas Baden-Württemberg : Ermitteltes Solarpotenzial auf Dachflächen*. URL <https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflächen/potenzial-dachflächenanlagen> – Überprüfungsdatum 2019-09-21
- [5] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, LANDESENTWICKLUNG UND ENERGIE: *Energie-Atlas Bayern : Solarenergie*. URL <https://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten/> – Überprüfungsdatum 2019-09-21
- [6] LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN: *Energieatlas NRW : Solarkataster*. URL [https://www.energieatlas.nrw.de/site/karte\\_solarkataster](https://www.energieatlas.nrw.de/site/karte_solarkataster) – Überprüfungsdatum 2019-09-21
- [7] ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Die amtlichen 3D-Gebäudemodelle in den Ausprägungen LoD1 und LoD2*. URL <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Weitere-Produkte/3D-Gebaeudemodelle-LoD/> – Überprüfungsdatum 2020-03-04
- [8] POGLOTSCH, Hanna ; HARTMANN, André ; SCHWARZ, Steffen ; HECHT, Robert ; EISENLOHR, Johannes ; FERRARA, Claudio ; BEHNISCH, Martin: Eine Frage des Flächensparens: Wo können eine Milliarde Photovoltaik-Module in Deutschland installiert werden?, Bd. 76. In: MEINEL, Gotthard (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring X : Flächenpolitik – Flächenmanagement – Indikatoren*. Berlin : Rhombos-Verl., 2018 (IÖR-Schriften, Band 76), S. 133–143
- [9] HARTMANN, André ; MEINEL, Gotthard ; HECHT, Robert ; BEHNISCH, Martin: *A Workflow for Automatic Quantification of Structure and Dynamic of the German Building Stock Using Official Spatial Data*. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5 (2016), Nr. 8. URL <http://www.mdpi.com/2220-9964/5/8/142>
- [10] BLEICHER, Thomas: *Su2rad - SketchUp to Radiance Exporter*. URL <https://tbleicher.github.io/su2rad/> – Überprüfungsdatum 2020-03-05
- [11] TRIMBLE INC.: *SketchUp*. URL <https://www.sketchup.com/> – Überprüfungsdatum 2020-03-05
- [12] 3DIS GMBH: *CityEditor*. URL <https://www.3dis.de/cityeditor/> – Überprüfungsdatum 2020-03-05
- [13] BUENO, Bruno ; WIENOLD, Jan ; KATSIFARAKI, Angelina ; KUHN, Tilmann E.: *Fener : A Radiance-based modelling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces*. In: *Energy and Buildings* 94 (2015), S. 10–20
- [14] UNBEKANNT: *Portolan : A guide through the negligently chartered waters of data analysis, visualization and the geospatial domain*. URL <http://portolan.leaffan.net/tag/shapely/>. – Aktualisierungsdatum: 2015-01-05 – Überprüfungsdatum 2020-03-04
- [15] HEYDENREICH, Wolfgang ; MÜLLER, Björn ; REISE, Christian: *Describing the World with three Parameters: A new Approach to PV Module Power Modelling*. In: *23rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)* (2008), S. 2786–2789
- [16] EMMINGHAUS, Christoph ; HERMS, Sarah ; NIWAZ, Nadeem ; UNDERBJERG, Kirstine Larsen ; WANGELIN, Matthias ; ZINKE, Guido: *Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept der Landeshauptstadt Dresden 2030 : Dresden auf dem Weg zur Energieeffizienten Stadt*. Dresden, 06/2013





PLATIN-SPONSOREN



SILBER-SPONSOR



BRONZE-SPONSOREN



STUDENTEN-SPONSOREN



KAFFEPAUSEN-SPONSOR



QUALITÄTSTAG-SPONSOR

