

PROJEKTBERICHT

Solarpotenzialanalyse für Gebäude in der Landeshauptstadt München

Stand 23.09.2020
Auftraggeber Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt
Sachgebiet Energie, Klimaschutz (RGU-UVO21)
Bayerstr. 28a, 80335 München
Auftragnehmer ENIANO GmbH, Schwanthalerstr. 73, 80336 München

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Projektrahmen	1
1.1.	Vorbemerkung und Zielsetzung.....	1
1.2.	Vorgehen zur Projektbearbeitung.....	2
1.3.	Kurzzusammenfassung der Ergebnisse.....	2
2.	Verwendete Datengrundlagen.....	3
3.	Analysemethoden und Randbedingungen	5
3.1.	Definition der Technologie- und Installationsvarianten.....	6
3.2.	Einstrahlungsanalyse	8
3.3.	Ermittlung von Potenzial-, Modul- und Kollektorflächen.....	13
3.3.1.	Potenzialflächen	13
3.3.2.	Modulflächen Photovoltaik.....	14
3.3.3.	Kollektorflächen Solarthermie.....	17
4.	Potenzialermittlung Photovoltaik	18
4.1.	Potenzialausweisung für Modulflächen	18
4.2.	Ausweisung von Potenzialflächen	19
4.3.	Ausweisung des gebäudespezifischen Potenzials	20
4.4.	Ausweisung des gesamtstädtischen Potenzials.....	20
5.	Potenzialermittlung Solarthermie.....	25
5.1.	Potenzialausweisung für Kollektorflächen	25
5.2.	Ausweisung von Potenzialflächen	26
5.3.	Ausweisung des gebäudespezifischen Potenzials	27
5.4.	Ausweisung des gesamtstädtischen Potenzials.....	29
6.	Anwendungsmöglichkeiten und Ausblick	32
6.1.	Publikation	32
6.2.	Fortschreibung.....	32
6.3.	Ausblick	33
7.	Beschreibung der Abgabedatensätze	34

7.1.	Modul- und Kollektorflächen	34
7.2.	Gebäudepotenziale	35
7.3.	Potenzialflächen	37
8.	Abbildungsverzeichnis	39
9.	Tabellenverzeichnis	40

1. Projektrahmen

1.1. Vorbemerkung und Zielsetzung

Das Referat für Gesundheit und Umwelt stellt seit mehreren Jahren eine interaktive Solarpotenzialkarte für das Stadtgebiet München zur Verfügung. Ziel dieses Projektes ist die Neuberechnung einer aktuellen Solarpotenzialkarte weitestgehend entsprechend des Funktionsumfangs der alten Solarpotenzialkarte aus dem Jahr 2014. Die neue Solarpotenzialkarte wird auf Grundlage neuerer Befliegungsdaten des Jahres 2017 und der im Rahmen des Energienutzungsplanes erhobenen Grundlagendaten erstellt. Die Solarpotenzialkarte stellt für alle Dachflächen in München das technisch realisierbare Solarpotenzial zur Erzeugung von Strom und Wärme dar. Sie wird als interaktive Karte für alle Bürgerinnen und Bürger über das Geoportale der LHM zur Verfügung gestellt.

Die erforderlichen Sachmittel für die Neuberechnung der Solarpotenzialkarte wurden über den Stadtratsbeschluss „Integriertes Handlungsprogramm Klimaschutz in München (IHKM) – Verlängerung des Klimaschutzprogramms 2015 für das Jahr 2018, Evaluierungsbericht Klimaschutzprogramm 2015“ (Sitzungsvorlage Nr. 14-20 / V 10195) zur Verfügung gestellt.

Die Solarpotenzialkarte dient der Erstinformation über die grundsätzliche Eignung der Dachflächen zur energetischen Nutzung durch Solarthermie und Photovoltaik. Die bisherige Karte stammt aus dem Jahr 2014 und bedarf der Aktualisierung bzw. muss neu erstellt werden, da sich der Gebäudebestand zwischenzeitlich verändert hat. Dies betrifft sowohl Neubau und Abriss von Gebäuden als auch Aus- und Umbauten von Dächern, was zu veränderten Verschattungssituationen führt. Deshalb war die Erstellung einer neuen Solarpotenzialkarte erforderlich, die auch eine Neubewertung unveränderter Gebäude erfordert. Weiterhin zielt die neue Solarpotenzialkarte auf die Ermittlung des technischen, mit Standardanlagen erschließbaren Potenzials, soweit dies anhand der vorliegenden Befliegungsdaten feststellbar ist, ab. Fragen der Wirtschaftlichkeit werden nur implizit über spezifische Ertragsgrenzen berücksichtigt. Die grundsätzliche Eignung wird analog zur Solarkarte von 2014 in mehrere Eignungsklassen differenziert. Sie soll über die erstellte Datengrundlage leicht verständlich visualisiert über das Geoportale der LHM allen Bürgerinnen und Bürgern bereitgestellt werden. Die Solarpotenzialkarte dient der Erstinformation der Bürgerinnen und Bürger. Bei Bedarf bzw. Interesse ist eine weiterführende Fachberatung (z.B. im Bauzentrum der LHM) nötig. Fragen zu Anlagekosten, Fördermitteln, Wirtschaftlichkeit, Modultechnologien, Dachstatik, Aufständigung sind im Rahmen dieser Beratungen zu erörtern.

1.2. Vorgehen zur Projektbearbeitung

Die Vorgehensweise zur Projektbearbeitung ist iterativ, da neue Aspekte in die Analyse der Solarpotenziale eingebracht wurden, in enger fachlicher Abstimmung zwischen Auftraggeberin (AG) und Auftragnehmerin (AN).

- I. Ausarbeitung des fachlichen Konzeptes
- II. Abstimmung des fachlichen Konzeptes zwischen AG und AN
- III. Durchführung der Analysen für ein Testgebiet
- IV. Evaluation der Analyseergebnisse durch AG und AN
- V. Anpassung der Analysemethode und Randbedingungen
- VI. Durchführung der Analysen für Gesamtstadt
- VII. Potenzialbewertung für Gesamtstadt
- VIII. Berichtslegung und Datenabgabe

1.3. Kurzzusammenfassung der Ergebnisse

Auf Basis eines stadtweiten 3D-Gebäudemodells, das 288.902 Bestandsgebäude mit etwa 41 Mio. m² Dachfläche umfasst, wurden die Solarpotenziale der Landeshauptstadt München analysiert.

Die Untersuchungen ergaben, dass **2.310 MW_P** (2.677 MW_P inklusive denkmalgeschützter Gebäude) Photovoltaik-Leistung auf allen grundlegend geeigneten Münchner Dachflächen installiert werden könnten. Die potenzielle Einsparung an Treibhausgasemissionen beträgt bilanziell **786.000 t/a** CO₂-Äquivalente (913.000 t/a CO₂-Äquivalente inklusive denkmalgeschützter Gebäude).

Weiterhin wurde ein Potenzial von etwa **570 GWh/a** für die solarthermische Warmwasserbereitung im Wohngebäudebestand ermittelt, wovon 112 GWh/a denkmalgeschützte Gebäude betreffen. Über die vollständige Nutzung dieses Solarthermiepotenzials könnten bilanziell Treibhausgasemissionen in Höhe von **157.000 t/a** CO₂-Äquivalente eingespart werden.

2. Verwendete Datengrundlagen

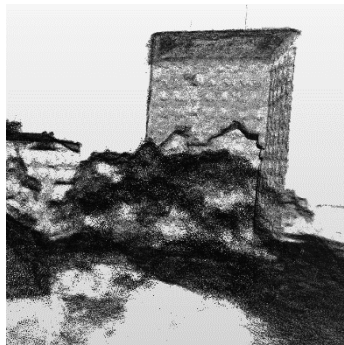
Zur Erstellung der Solarpotenzialkarte wurden folgende Geobasisdaten verwendet:



Digitale Stadtgrundkarte

ALKIS Gebäudeumrisse im ESRI Shape Format für das Stadtgebiet Münchens

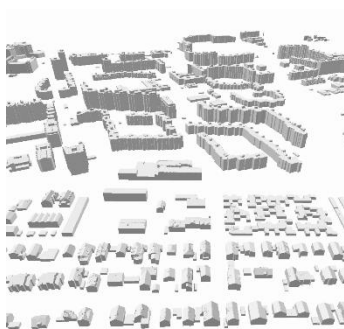
Datenquelle: Geodatenservice München
Stand: 2017



Digitales Oberflächenmodell (DOM)

Digitales Oberflächenmodell im TIF-Format mit einer Bodenauflösung von 10 cm für das Stadtgebiet Münchens, generiert aus photogrammetrisch erzeugter 3D-Punktwolke

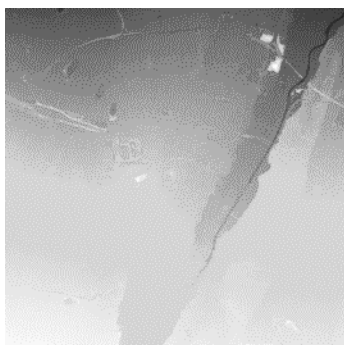
Datenquelle: Geodatenservice München
Stand: 2017



3D-Stadtmodell

Im Rahmen des Energienutzungsplan München auf Grundlage der 3D-Punktwolke (DOM) erstelltes 3D-Stadtmodell (LoD2) für das Stadtgebiet Münchens

Datenquelle DOM: Geodatenservice München
Datenquelle 3D-Modell: ENIANO GmbH
Stand: 2017



Digitales Geländemodell (DGM50)

Digitales Geländemodell in einer Gitterweite von 50m, über das Stadtgebiet hinaus zur Analyse der Fernverschattung.

Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (OpenData)

Zur Simulation der solaren Einstrahlung auf Dachflächen wurden stündlich aufgelöste Direkt- und Diffusstrahlungswerte auf die horizontale Ebene eines mittleren Jahres für München aus der Meteororm-Datenbank der Firma Meteotest (Schweiz) verwendet. Folgende Jahreswerte ergeben sich aus diesem Datensatz:

Direktstrahlung in kWh/m ² a	Diffusstrahlung in kWh/m ² a	Globalstrahlung in kWh/m ² a
577,84	588,37	1.166,21

Die Jahresglobalstrahlung ergibt sich aus der Summe von Diffus- und Direktstrahlung. Nachfolgende Grafik zeigt die den Analysen zu Grunde liegenden monatlichen Werte von Direkt- und Diffusstrahlung auf die horizontale Ebene über den Jahresverlauf für den Standort München:

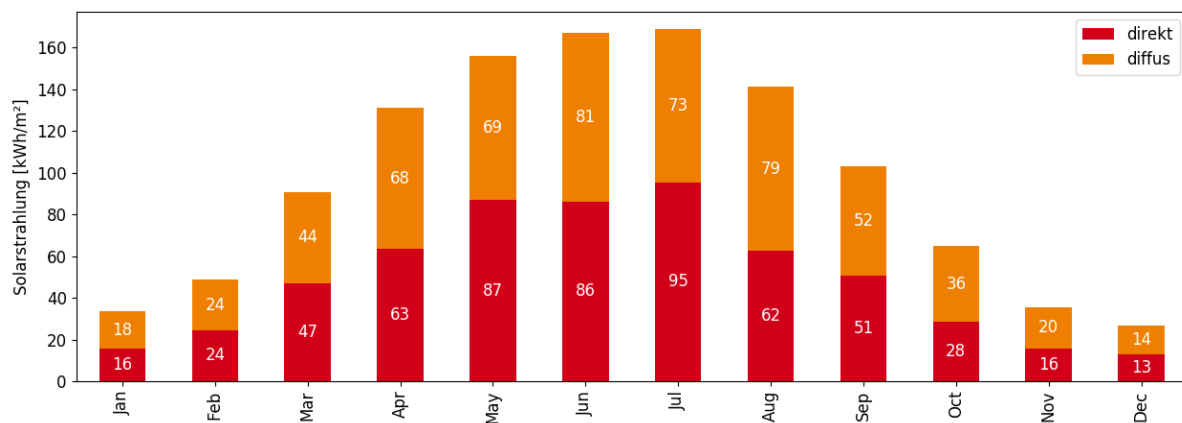


Abbildung 2-1: Monatliche Werte der Direkt- und Diffusstrahlung auf die horizontale Ebene am Standort München

Der Anteil der Diffusstrahlung liegt somit von August bis Januar über dem der Direktstrahlung. Durch die lokale Verschattung (Gebäude, Bäume etc.) und die Fernverschattung im Voralpenraum ist nur ein Teil der theoretisch verfügbaren Globalstrahlung auf Dachflächen nutzbar. Die Fernverschattung durch die Alpen spielt in München nahezu keine Rolle, lokale Verschattungen haben jedoch wesentlichen Einfluss und sollten bei der Planung von Photovoltaikanlagen berücksichtigt werden, da sie zu relevanten Ertragseinbußen führen können.

3. Analysemethoden und Randbedingungen

Die solare Strahlungsenergie, die täglich auf die Dachflächen Münchens trifft, kann sowohl zur Wärmeerzeugung (Solarthermie, kurz: ST) als auch zur Stromerzeugung (Photovoltaik, kurz: PV) genutzt werden. Die genannten Technologien stellen in Ihrer Anwendung unterschiedliche Anforderungen an die tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit von Energie sowie an die Art der Installation. Im Rahmen der Analysen wird diesen Anforderungen über die Ausweisung des Potenzials in technologie- (PV / ST) und dachspezifischen (geneigtes Dach / Flachdach) Varianten Rechnung getragen. Ziel ist es, für beide Technologien das nutzbare Potenzial auf allen Dachflächen Münchens dachflächenscharf auszuweisen. Die Berechnung des Solarpotenzials erfolgt in vier Schritten:

I. Variantendefinition

Definition der im Rahmen der Solaranalyse zu berücksichtigenden Installationsvarianten in Abhängigkeit der zu untersuchenden Technologie sowie des Dachtyps.

II. Einstrahlungsanalyse auf Dachflächen

Nach Filterung aller relevanten Dachflächen wird der solare Eintrag in einer Auflösung von 10 cm für alle Dachflächen Münchens und alle dachflächenspezifisch vorgesehenen Varianten simuliert.

III. Ausweisung von Potenzialflächen

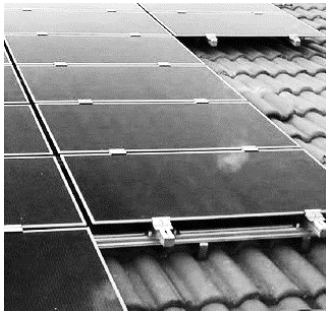
Auf Grundlage der berechneten Solareinträge auf Dachflächen werden jene Flächen berechnet, die sich für eine Installation von PV oder ST eignen. Dabei werden sowohl theoretische Modulbelegungen als auch Eignungspolygone ausgewiesen.

IV. Berechnung des Potenzials

Die Berechnung des Potenzials erfolgt für die Eignungsflächen auf Grundlage von Gesamtwirkungsgraden und angenommenen Verbrauchsmustern. Eine Aggregation des Potenzials auf Gebäudeebene sowie im Weiteren auf Ebene der Stadt München gibt Aufschluss über das Gesamtpotenzial.

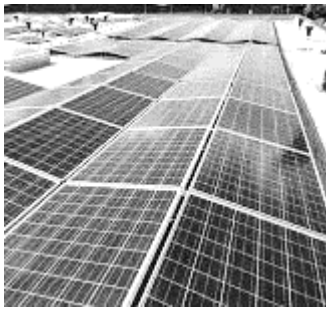
3.1. Definition der Technologie- und Installationsvarianten

Abhängig von der eingesetzten Technologie (PV oder ST) sowie des betrachteten Dachtyps werden im Rahmen der Analyse verschiedene Installationsvarianten betrachtet. Nachstehende Auflistung zeigt und beschreibt diese Installationsvarianten und die getroffenen Annahmen.



Photovoltaik und Solarthermie, dachparallele Installation (PAR)

Die dachparallele Installation findet sowohl bei PV als auch ST Anwendung. Sie ist einfach realisierbar, erfolgt meist auf einer Trägerkonstruktion mit geringem Abstand zur Dachhaut und hat daher verhältnismäßig geringe Auswirkungen auf das städtebauliche Erscheinungsbild. Abhängig von Ausrichtung und Neigung des Daches variieren die Jahreserträge sowie die tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit der gewonnenen Energie.



Photovoltaik, Ost-West-Ausrichtung und 10° Neigung (PV-OW10)

Ost-West ausgerichtete PV-Module mit einer Neigung von 10° kommen in der Regel auf Flachdächern zum Einsatz. Die Installation ist vergleichsweise einfach realisierbar, erfolgt meist auf einer Trägerkonstruktion mit geringem Abstand zur Dachhaut und hat daher verhältnismäßig geringe Auswirkungen auf das städtebauliche Erscheinungsbild. Die Neigung dient hauptsächlich dem Abfluss von Wasser, Schnee und Verunreinigungen.



Photovoltaik, Süd-Ausrichtung und 30° Neigung (PV-S30)

Nach Süden ausgerichtete PV-Module mit einer Neigung von 30° kommen überwiegend auf Flachdächern zum Einsatz. Die Installation ist durch die meist erhöhte Unterkonstruktion etwas aufwändiger und kann das städtebauliche Erscheinungsbild prägen. Die Neigung maximiert den spezifischen Ertrag je Modul und sorgt für Abfluss von Wasser, Schnee und Schmutz. Demgegenüber steht ein erforderlicher Modulreihenabstand, um Verschattungen zu minimieren.

Solarthermie, Süd-Ausrichtung und 45° Neigung**(ST-S45)**

Nach Süden ausgerichtete Solarthermiekollektoren mit einer Neigung von 45° erhöhen die solaren Erträge während des Winterhalbjahres zur Warmwasserbereitung und einer gegebenenfalls zusätzlichen Heizungsunterstützung. Die Installation erfordert teils aufwändigere Trägerkonstruktionen für die Kollektoren und aufgrund der Zunahme der Windlast auf die Konstruktion evtl. auch eine Änderung der Statik des Gebäudes. Diese Form der Installation kann das städtebauliche Erscheinungsbild prägen. Aufgrund der Kollektorhöhe und der hohen Neigung sind vergleichsweise große Reihenabstände einzuhalten.

Als Grundlage für die Potenzialanalysen wurden folgende technologie- und dachspezifische Varianten definiert:

Variante	Technologie	Ausrichtung	Neigung	Δh	Dachflächen
PAR	PV + ST	dachparallel	dachparallel	0,2 m	alle
O10	PV	90°	10°	0,5 m	Flachdach
W10	PV	270°	10°	0,5 m	Flachdach
S30	PV	180°	30°	1,0 m	Flachdach
S45	ST	180°	45°	1,0 m	Flachdach

Tabelle 3-1: Kennzahlen der betrachteten Varianten zur Einstrahlungsanalyse

Die Ausrichtung wird dabei im Uhrzeigersinn von Nord angegeben, die Neigung ausgehend von der horizontalen Ebene. Der Parameter Δh gibt den vertikalen Abstand von der Dachhaut an, der für die

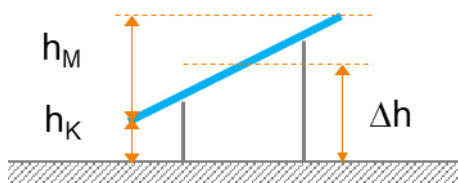


Abbildung 3-1: Definition der Analysehöhen über Dachhaut

Analyse der solaren Einstrahlung berücksichtigt wird. Er setzt sich aus der angenommenen Höhe der Unterkonstruktion (h_K , ab Unterkante Modul / Kollektor) sowie der halben Höhe des (aufgeständerten) Moduls / Kollektors (h_M) zusammen. Bei dachparalleler Installation sowie der Variante O/W10 erfolgt keine Berücksichtigung von h_M . Für die Installationsvariante O/W10 wird für jeden Ort der Dachfläche (Analysepunkt) sowohl die solare Einstrahlung bei einer Ausrichtung nach Osten als auch bei einer Ausrichtung nach Westen berechnet.

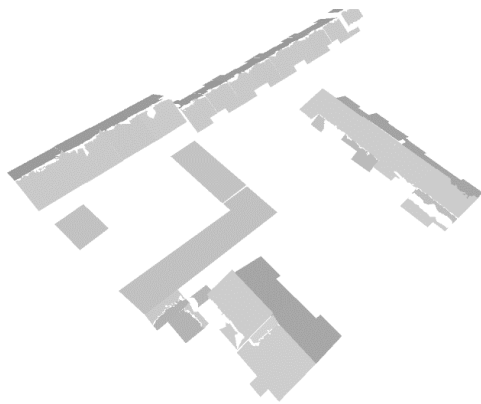
Flachdächer werden über ihren Neigungswinkel definiert, der 10° nicht überschreitet. Dieser vergleichsweise hohe Wert bezieht die Genauigkeit des zu Grunde liegenden 3D-Gebäudemodells mit ein.

3.2. Einstrahlungsanalyse

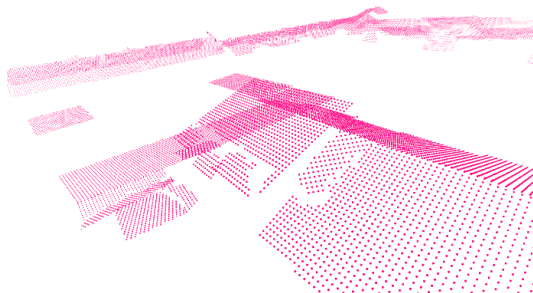
Die Einstrahlungsanalyse erfolgt für alle Dachflächen Münchens und die zuvor festgelegten Installationsvarianten. Ergebnis bilden monatliche Werte der Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung sowie des Verschattungsgrades in einer räumlichen Auflösung von 10 cm in der Dachebene. Nachfolgend ist die prinzipielle Vorgehensweise der Analyse an einem Beispiel verdeutlicht:



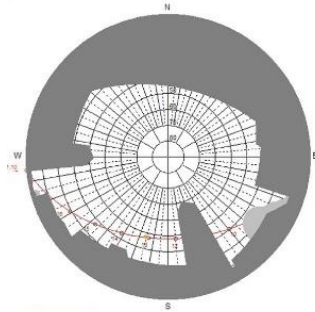
Im Beispielgebiet sind geneigte Dächer unterschiedlicher Ausrichtung und Flachdächer enthalten, sowie verschattende Vegetation und sich gegenseitig verschattende Gebäude. Damit deckt es die meisten Konstellationen hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die solare Einstrahlung auf Dachflächen im Stadtgebiet ab.



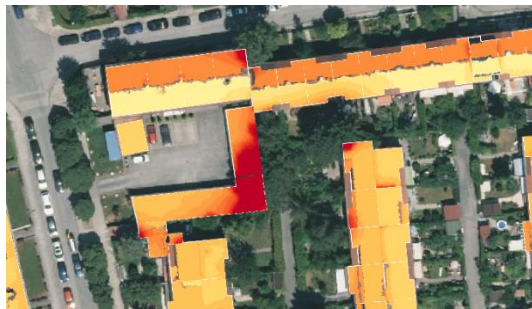
Grundlage der Analysen bildet das 3D-Gebäudemodell, welches im Rahmen des Projektes „Teil-Energienutzungsplan für die Landeshauptstadt München“ durch die ENIANO GmbH erstellt wurde und alle Dachflächen der Stadt mit Stand 2017 abbildet. Nebenstehend sind die Dachflächen für das Beispielgebiet abgebildet. Das Modell beinhaltet größere Dachgauben und Schornsteine, kleine Elemente auf Dächern sowie Dachfenster und dachparallele PV-/ST-Installationen sind in der Regel nicht enthalten.



Für jede Dachfläche sind in einem Raster von 10 cm (in Dachflächenebene) Analysepunkte in 3D definiert. Diese bilden die Grundlage zur Berechnung der solaren Einstrahlung am jeweiligen Punkt für die gegebenen Varianten (siehe 3.1).



Um die lokale Verschattungssituation zu berücksichtigen, wird diese für jeden Analysepunkt auf Basis des DOM ermittelt. Der Einfluss von Vegetation* und umliegenden Gebäude etc. findet dadurch Berücksichtigung.



Ausgehend von der dachparallelen Variante zeigt nebenstehende Darstellung die errechnete Jahresglobalstrahlung (dunkelrot: geringe Werte bis gelb: hohe Werte) für alle Dachflächen im Testgebiet. Für jeden Analysepunkt wurden so die Einstrahlungswerte für jede Technik-Variante ermittelt. Erkennbar ist der Effekt von Ausrichtung und Neigung der Dachflächen sowie der Einfluss der Nahverschattung durch umliegende Gebäude und Vegetation.



Weiterhin wurde für jede Dachfläche und jede Variante der Verschattungsgrad (aus dem Einfluss der Nah- und Fernverschattung) berechnet, ein Beispiel ist nebenstehend abgebildet (je dunkler, desto höher die Verschattung). Erkennbar ist der Einfluss der Nahverschattung durch umliegende Gebäude und Vegetation, nicht berücksichtigt werden dabei die Ausrichtung und Neigung der Dachflächen. Der Verschattungsgrad stellt eine wesentliche Planungsgrundlage zur Errichtung von PV-Anlagen dar.

(*) Innerhalb des digitalen Oberflächenmodells (DOM) wird der belaubte Zustand der Vegetation in den Daten abgebildet, was gegebenenfalls zu einer Unterschätzung der Einstrahlungsverhältnisse im Winter bzw. der unbelaubten Zeit des Jahres führen kann.

Für jeden Analysepunkt wurden über diese Vorgehensweise Monats- und Jahressummen für die Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung sowie der Verschattungsgrad für jede der definierten Varianten PAR, 10O, 10W, 30S und 45S ausgewiesen.

Nachstehend werden die Ergebnisse für die einzelnen Varianten am Beispiel eines Mehrfamilienhauses (MFH) mit Flachdach und Dachaufbau sowie eines stark verschatteten Garagendaches (GAR) in München diskutiert. Der Dachaufbau des MFH befindet sich zentral nach Norden versetzt, das Dach des MFH ist nicht durch umliegende Objekte verschattet. GAR ist stark durch umliegende Vegetation sowie das MFH im Süden verschattet.

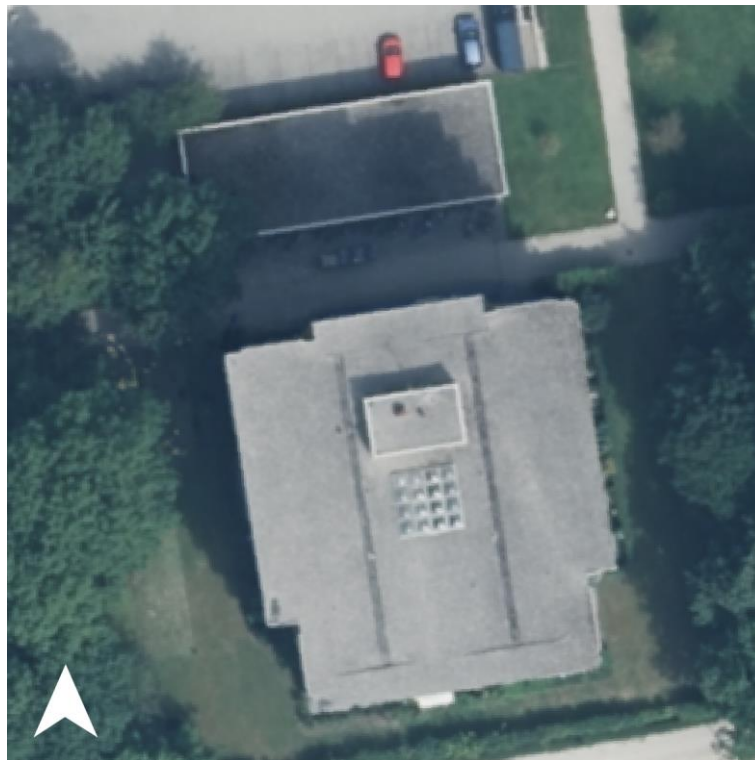
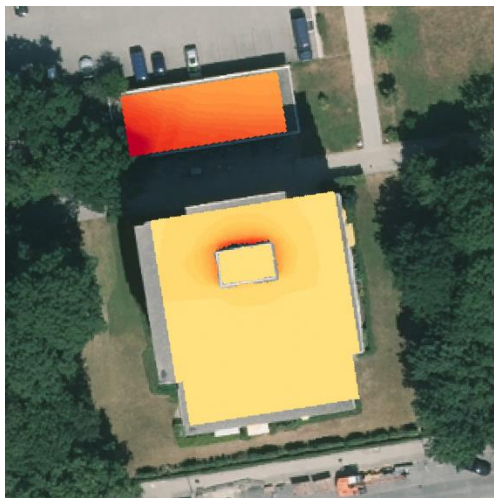


Abbildung 3-2: Luftbild des Beispielgebäudes zur Veranschaulichung von Analysemethodik und Ergebnissen

Variante PAR



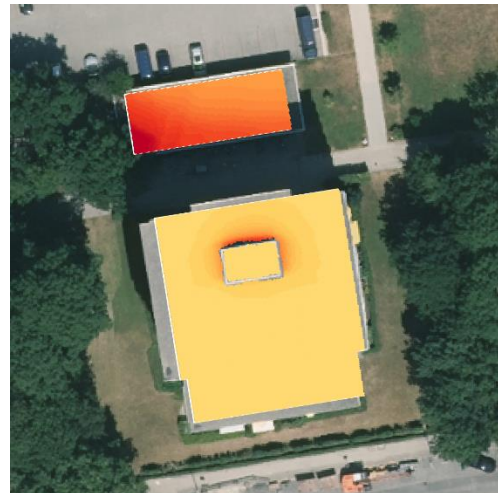
Jahresglobalstrahlung in kWh/m²a



Variante O10



Variante W10



Variante S30



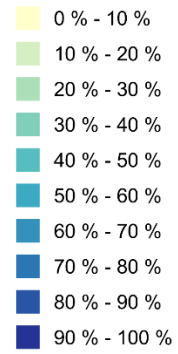
Variante S45



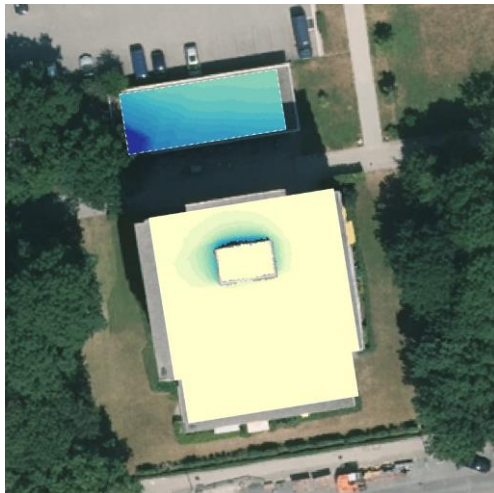
Variante PAR



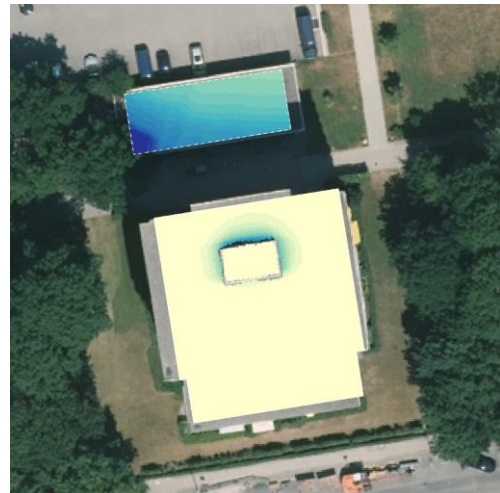
Prozentualer Verschattungsgrad



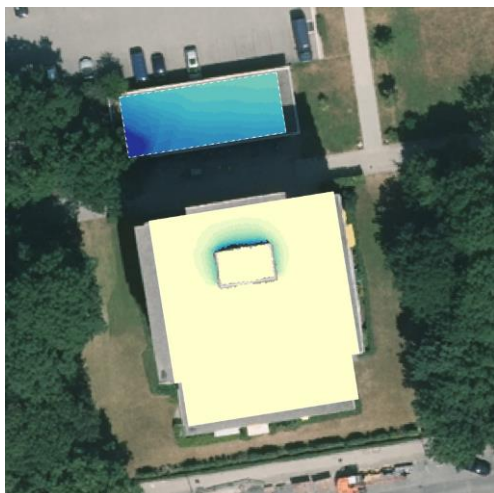
Variante O10



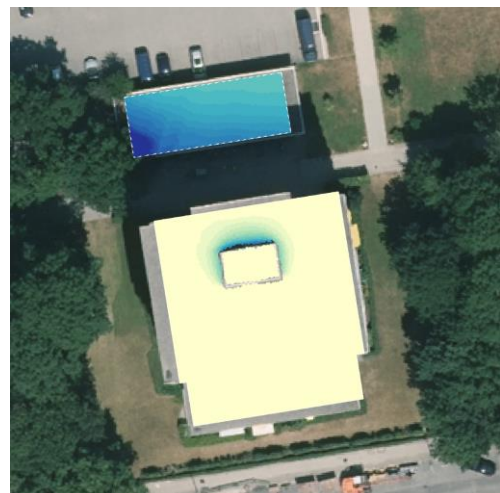
Variante W10



Variante S30



Variante S45



3.3. Ermittlung von Potenzial-, Modul- und Kollektorflächen

3.3.1. Potenzialflächen

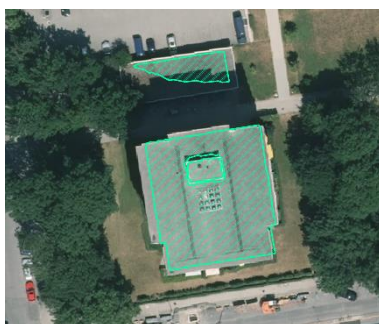
Die Ermittlung von Potenzialflächen erfolgt auf Basis von Grenzwerten für Jahresglobalstrahlung und Verschattungsgrad.

Variante	Jahresglobalstrahlung		Verschattungsgrad	
	Photovoltaik	Solarthermie	Photovoltaik	Solarthermie
PAR	> 600 kWh/m ² a	> 600 kWh/m ² a	< 50 %	< 50 %
O/W10	> 600 kWh/m ² a	-	< 50 %	-
S30	> 600 kWh/m ² a	-	< 50 %	-
S45	-	> 600 kWh/m ² a	-	< 50 %

Tabelle 3-2: Kennzahlen der betrachteten Varianten und entsprechender Grenzwerte zur Ermittlung von Potenzialflächen

Die Berechnung des Grenzwertes für die Variante O/W10 erfolgt auf Grundlage des Mittelwertes der Jahresglobalstrahlung sowie des Mittelwertes des Verschattungsgrades aus den Solarstrahlungsanalysen O10 und W10.

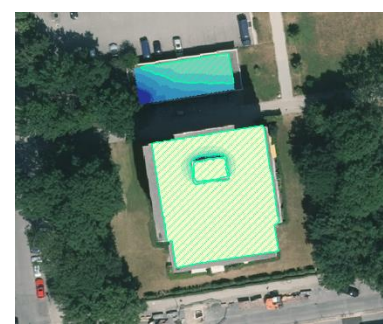
Ergebnis bilden Eignungsflächen in Form von Polygonen, die den jeweiligen Mindestanforderungen hinsichtlich Jahresglobalstrahlung und Verschattungsgrad genügen. Nachstehende Abbildung zeigt die resultierenden Eignungsflächen für die Variante PAR, hinterlegt mit dem Luftbild, der Jahresglobalstrahlung sowie dem Verschattungsgrad für eine Beispielliegenschaft mit Flachdach und starker Verschattung des rückwärtigen Garagengebäudes.



Eignungsfläche



Jahresglobalstrahlung



Verschattungsgrad

Kleinere Dachaufbauten und Technikkomponenten (z.B. Sanitärventilatoren, Schornsteine, Antennen, kleine Dachgauben), Dachfenster, bestehende Photovoltaik- und Solarthermieanlagen etc. können bei der Berechnung der Eignungsflächen nicht bzw. nur bedingt berücksichtigt werden. Begründet ist dies hauptsächlich durch den Detaillierungsgrad des 3D-Gebäudemodells, welches diese Objekte nicht explizit abbildet.

3.3.2. Modulflächen Photovoltaik

Auf Basis der berechneten Eignungsflächen wurde deren mögliche Belegung mit Photovoltaikmodulen errechnet. Es wurden Modulabmessungen von 1,70 m Länge und 1,0 m Breite zu Grunde gelegt, diese entsprechen den Abmessungen marktüblicher Module.

Die Berechnungen erfolgten für jede Variante, nachstehende Tabelle zeigt die zu Grunde liegenden, variantenspezifischen Grenzwerte und Annahmen:

Variante	Jahresglobalstrahlung	Verschattungsgrad	Modulreihenabstand	Modulausrichtung*	Modulneigung
PAR	> 600 kWh/m ² a	< 50 %	-	Dachfläche	Dachfläche
OW10	> 600 kWh/m ² a	< 50 %	-	Ost-West	10°
S30	> 600 kWh/m ² a	< 50 %	2,47 m	Nord-Süd	30°

(*) Ausrichtung der Langen Kante

Tabelle 3-3: Kennzahlen der betrachteten Modulvarianten zur Ermittlung des Photovoltaikpotenzials

Die Berechnung des Modulreihenabstandes erfolgte ausgehend von einer Verschattungsfreiheit zum höchsten Sonnenstand am 21.12. (mittags zur Wintersonnenwende). Dieser beträgt in München in etwa 19°, was bei 30° Aufständigungswinkel zu einem Modulreihenabstand (D) von 2,47 m führt.

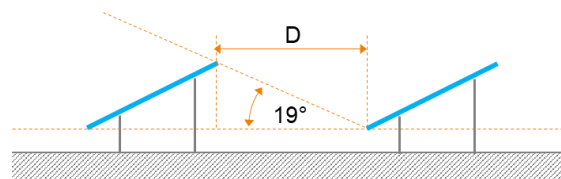


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung von Verschattungswinkel und Modulreihenabstand

Analog zur Berechnung der Eignungsflächen können bei der Modulbelegung kleinere Dachaufbauten und Technikkomponenten (z.B. Sanitärventilatoren, Schornsteine, Antennen, kleine Dachgauben), Dachfenster, bestehende Photovoltaik- und Solarthermieanlagen etc. nicht berücksichtigt werden. Begründet ist dies hauptsächlich durch den Detaillierungsgrad des 3D-Gebäudemodells, welches diese Objekte nicht abbildet.



Abbildung 3-4: Beispielhafte Darstellung von Eignungsflächen und Solarmodulen im Einfamilienhausbestand

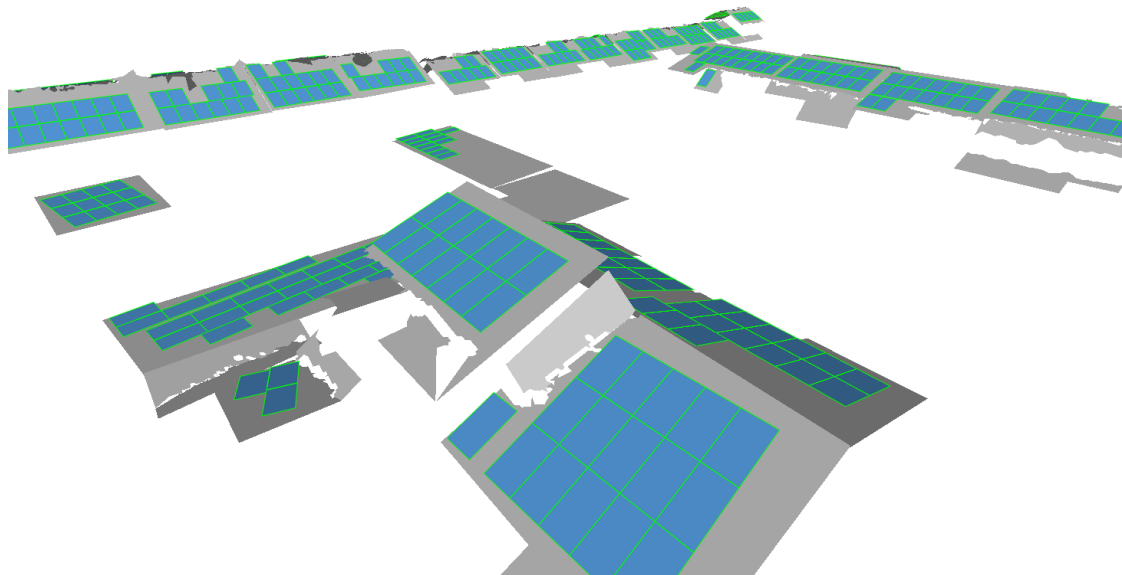
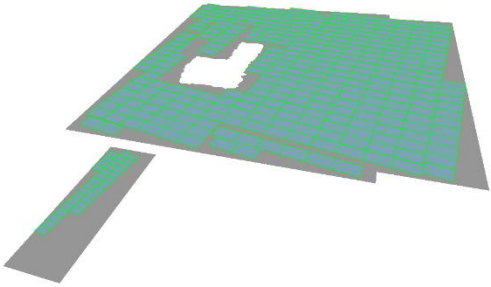


Abbildung 3-5: Beispielhafte 3D-Darstellung von Modulen auf 3D-Gebäudemodell

Beispielgebäude mit Modulbelegung OW10



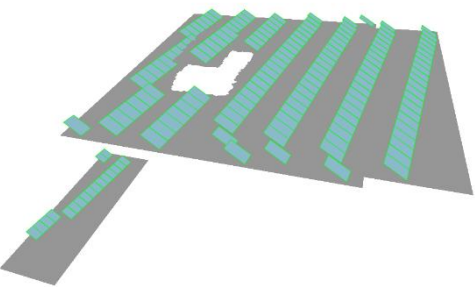
3D-Darstellung OW10



Beispielgebäude mit Modulbelegung S30



3D-Darstellung S30



3.3.3. Kollektorflächen Solarthermie

Auf Basis der berechneten Eignungsflächen wurde deren mögliche Belegung mit Solarthermiekollektoren errechnet. Es wurden Kollektorabmessungen von 2,0 m Länge und 1,0 m Breite zu Grunde gelegt, es handelt sich hierbei um marktübliche Kollektorabmessungen.

Die Berechnungen erfolgten für jede Variante, nachstehende Tabelle zeigt die zu Grunde liegenden, variantenspezifischen Grenzwerte und Annahmen:

Variante	Jahresglobalstrahlung	Verschattungsgrad	Kollektorreihenabstand	Kollektorausrichtung	Kollektorneigung
PAR	> 600 kWh/m ² a	< 50 %	-	Dachfläche	Dachfläche
S45	> 600 kWh/m ² a	< 50 %	4,10 m	Nord-Süd	45°

Tabelle 3-4: Kennzahlen der betrachteten Kollektorvarianten zur Ermittlung des Solarthermiepoteziels

Die Berechnung des Kollektorreihenabstandes erfolgte ausgehend von einer Verschattungsfreiheit zum höchsten Sonnenstand am 21.12 (Wintersonnwende). Dieser beträgt in München in etwa 19°, was bei 45° Aufständigungswinkel zu einem Kollektorreihenabstand (D) von 4,10 m führt.

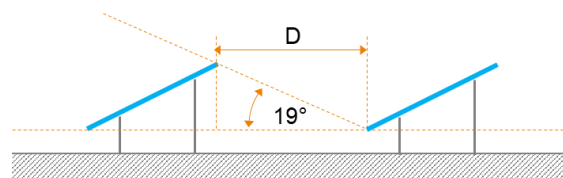


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung von Verschattungswinkel und Kollektorreihenabstand

Analog zur Berechnung der Eignungsflächen können bei der Kollektorbelegung kleinere Dachaufbauten und Technikkomponenten (z.B. Sanitärentlüftungen, Schornsteine, Antennen, kleine Dachgauben), Dachfenster, bestehende Photovoltaik- und Solarthermieanlagen etc. nicht berücksichtigt werden. Begründet ist dies hauptsächlich durch den Detaillierungsgrad des 3D-Gebäudemodells, welches diese Objekte nicht abbildet.

4. Potenzialermittlung Photovoltaik

Ziel der Potenzialermittlung ist es, dachflächenspezifische Erträge möglicher Photovoltaikanlagen zu ermitteln und daraus ein stadtweites Gesamtpotenzial abzuleiten. Dies erfolgte auf Grundlage der berechneten Eignungspolygone bzw. Modulflächen. Folgende grundlegende Annahmen wurden zur Potenzialermittlung für Photovoltaikanlagen getroffen:

Modullänge:	1,7 m	
Modulbreite:	1,0 m	
Modulfläche:	1,7 m ²	A_M
Peakleistung Modul:	380,0 W _P	P_M
Systemwirkungsgrad:	18,0 %	η_S

Der Systemwirkungsgrad η_S definiert dabei die Effizienz der Umwandlung von solarer Einstrahlung in Wechselstrom und berücksichtigt zusammenfassend

- den mittleren Wirkungsgrad der Module (Umwandlung von Solarstrahlung in Gleichstrom)
- die Verluste der DC-Verkabelung (Weiterleitung des Gleichstroms zum Wechselrichter)
- die Verluste im Wechselrichter (Wirkungsgrad für die Umwandlung von DC in AC)
- die Verluste der AC-Verkabelung (Weiterleitung des Wechselstroms zum Einspeisepunkt)

4.1. Potenzialausweisung für Modulflächen

Die berechneten Modulflächen für die definierten Varianten enthalten Information zur Modulgeometrie sowie zu den monats- und jahresweisen Summen an Global-, Diffus- und Direktstrahlung, die auf das jeweilige Modul eintreffen. Auf dieser Grundlage können modulspezifische Erträge im Sinne eines Potenzials ausgewiesen werden.

Der mittlere Wechselstromertrag pro Modul E_M errechnet sich dabei über

$$E_M = E_{M,S} * \eta_S$$

unter Annahme eines Systemwirkungsgrades (η_S) von 18,0 %.

Dabei stellt $E_{M,S}$ die gesamte, auf das Modul eintreffende Jahressumme der Globalstrahlung dar. Die über den Stromertrag eines Moduls errechnete mögliche CO₂-Vermeidung (THG_{red_M}) ergibt sich unter Annahme eines Emissionsfaktors (f_{CO_2}) bezüglich des deutschen, lokalen Strommix von 401 g / kWh_{el}¹ (Bezugsjahr 2019) zu:

$$THG_{red_M} = E_M * f_{CO_2}$$

Zusammenfassend werden für jedes Modul folgende Kennwerte berechnet:

Flächeninhalt	m ²	A_M
Peakleistung	W _P	P_M
Jahresglobalstrahlung	kWh/a	$E_{M,S}$
Jahresstromertrag	kWh/a	E_M
CO ₂ -Vermeidung	kg	THG_{red_M}

4.2. Ausweisung von Potenzialflächen

Für jede Installationsvariante von Photovoltaikanlagen wurden für jedes Dach Potenzialflächen ermittelt (siehe auch Kapitel 3.3.1). Im Rahmen der Potenzialausweisung werden für diese Flächen die installierbare Peakleistung, der jährliche Stromertrag und die resultierende CO₂-Vermeidung berechnet. Diese ergeben sich aus der Summation der Werte über alle Modulflächen, die innerhalb der jeweiligen Potenzialfläche liegen. Für jede Potenzialfläche und jede errechnete Variante werden folgende Potenzialwerte ermittelt:

¹ Umweltbundesamt, Januar 2020: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommixes



Flächeninhalt Potenzialfläche	m ²	A_F
Anzahl Module	-	$n_{M,F}$
Gesamtfläche Module	m ²	$A_{M,F}$
Peakleistung Module	W _P	P_F
Jahresstromertrag	kWh	E_F
CO ₂ -Vermeidung	kg	THG_{red_F}

4.3. Ausweisung des gebäudespezifischen Potenzials

Das gebäudespezifische Potenzial bezieht sich auf die Gebäudegrundrisse der digitalen Stadtgrundkarte. Es errechnet sich über die Summe von installierbarer Peakleistung (P_M), Jahresstromertrag (E_M) und der erreichbaren CO₂-Vermeidung (THG_{red_M}) der im Gebäude liegenden Modulflächen. Je nach Art der jeweiligen Dachfläche geht eine unterschiedliche Variante in die Summenbildung ein: Für geneigte Dächer geht das Potenzial der dachparallelen Variante (PAR) in die Summe ein, für Flachdächer die Variante Ost-West mit einer Neigung von 10° (O/W10). Hieraus ergeben sich für jedes Gebäude folgende Potenzialwerte:

Anzahl Module	-	$n_{M,G}$
Gesamtfläche Module	m ²	$A_{M,G}$
Peakleistung Module	W _P	P_G
Jahresstromertrag	kWh	E_G
CO ₂ -Vermeidung	kg	THG_{red_G}

4.4. Ausweisung des gesamtstädtischen Potenzials

Das theoretische, gesamtstädtische Potenzial ergibt sich aus der Summe der gebäudespezifischen Potenziale. Dieses übersteigt jedoch das technisch realisierbare Potenzial wesentlich. Zur Abschätzung des technisch realisierbaren Potenzials wurden daher gebäudespezifische sowie pauschalisierte Reduktionsfaktoren auf das theoretische Potenzial angewendet.

Das gesamte theoretische Potenzial der Münchner Dachflächen ergibt sich aus der Summe der Gebäudepotenziale jener Gebäude, die nicht denkmalgeschützt sind (Einzeldenkmäler und Ensembleschutz). Die theoretisch installierbare Leistung (P_{t_Stadt}) ergibt sich zu:

$$P_{t_Stadt} = \sum P_G$$

Der theoretisch erzielbare Jahresstromertrag (E_{t_Stadt}) ergibt zu:

$$E_{t_Stadt} = \sum E_G$$

Aus dem theoretischen Potenzial lässt sich über die Anwendung eines Reduktionsfaktors (f_{red}) das realisierbare Potenzial (P_{r_Stadt} und E_{r_Stadt}) ableiten, abzüglich des bereits genutzten Potenzials, das auf Grundlage der installierten Leistung (P_{ist}) ermittelt wird. Die installierte Leistung wird dabei mit 59,1 MW_P angenommen². Der mittlere, spezifische Jahresertrag (E_{spec}) wird überschlägig mit 850 kWh/kW_P angenommen, auf Basis des in dieser Studie errechneten Verhältnisses von E_{t_Stadt} zu P_{t_Stadt} . Stellt man diesen Wert der Leistung aller bestehenden Münchner EEG-Anlagen (PV) in 2016 gegenüber, so ergibt sich aus einer installierten Leistung von 55,6 MW_P und einer Einspeisung von 42,25 GWh, so ergibt dies einen spezifischen Ertrag von 760 kWh/kW_P³. Der wesentlich höhere angesetzte Wert von 850 kWh/kW_P dieser Solaranalyse liegt einerseits in der effizienteren Technologie (gegenüber Bestandsanlagen), die für künftige PV-Anlagen angenommen wurde, sowie in den Unterschieden bei der Einstrahlung zwischen dem im Rahmen der Studie verwendeten mittleren Jahr und dem Jahr 2016.

$$P_{r_Stadt} = P_{t_Stadt} * f_{red} - P_{ist}$$

$$E_{r_Stadt} = E_{t_Stadt} * f_{red} - (P_{ist} * E_{spec})$$

² https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Klimaschutz_und_Energie/Regenerative_Energiequellen/Solarenergie.html#Photovoltaik

³ Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt, Juni 2017: Entwicklung der EEG-Anlagen in München 2001-2016

Der Reduktionsfaktor f_{red} ergibt sich, in Anlehnung an Analysen des Potenzials der Bundeshauptstadt Berlin⁴, aus den folgenden Einflussgrößen zu:

Reduktion Modellgenauigkeit	-10%
Reduktion Gründächer / anderweitig genutzte Dächer	-10%
Reduktion Eigentumsart / Nutzung	-20%
Reduktion gesamt	-40%

Tabelle 4-1: Reduktionsfaktoren zur Anwendung auf das theoretische Photovoltaikpotenzial

Mit dem Abschlag „Eigentumsart“ wird der schwierigen Realisierbarkeit von PV-Anlagen bei Wohnungseigentümergeinschaften (WEG) Rechnung getragen.

Die potenzielle Reduktion des jährlichen Ausstoßes an Treibhausgasemissionen durch den Ausbau der Photovoltaik im Stadtgebiet Münchens ergibt sich aus der Substitution des aktuellen deutschen Strommix. Hierbei wird ein Emissionsfaktor (f_{CO_2}) von 401 g / kWh_{el}⁵ (Bezugsjahr 2019) zu Grunde gelegt.

$$THGred_{Stadt} = E_{r_Stadt} * f_{CO_2}$$

Das gesamtstädtische, **theoretische** Potenzial zum Ausbau der Photovoltaik ergibt sich nach beschriebener Berechnungsmethodik zu:

Denkmalschutz	installierbare Peakleistung in MWp	jährlicher Stromertrag in GWh/a	vermiedene THG-Emissionen in Tsd. t/a	Anzahl Module in Tsd.
NEIN	3.933	3.350	1.343	10.350
JA	626	527	211	1.648
Gesamt	4.559	3.877	1.555	11.998

Tabelle 4-2: Kennzahlen des gesamtstädtischen, theoretischen Photovoltaikpotenzials

⁴ Berner, Siegel und Quaschnig, 2018: Das Berliner Solarpotenzial, Kurzstudie

⁵ Umweltbundesamt, Januar 2020: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommixes

Reduziert man dieses Potenzial über den angenommenen Gesamtreduktionsfaktor von 40 %, so ergibt sich das stadtweite, realisierbare Potenzial zu:

Denkmalschutz	installierbare Peakleistung in MW _P	jährlicher Stromertrag in GWh/a	vermiedene THG-Emissionen in Tsd. t/a	Anzahl Module in Tsd.
NEIN	2.360	2.010	806	6.210
JA	376	316	127	989
Gesamt	2.736	2.326	933	7.199

Tabelle 4-3: Kennzahlen des gesamtstädtischen, realisierbaren Photovoltaikpotenzials

Betrachtet man den Anteil denkmalgeschützter Gebäude am realisierbaren Photovoltaikpotenzial, so nehmen diese etwa 14 % hinsichtlich des jährlichen Stromertrages ein.



Abbildung 4-1: Jährlicher Stromertrag des realisierbaren Photovoltaikpotenzials, differenziert nach denkmalgeschützten und nicht denkmalgeschützten Gebäuden

Durch Subtraktion der Peakleistung des Anlagenbestands (59 MW_P) ergibt sich das nachfolgend dargestellte, reduzierte **letztlich realisierbare** Potenzial für die LH München:

Denkmalschutz	installierbare Peakleistung in MW _P	jährlicher Stromertrag in GWh/a	vermiedene THG-Emissionen in Tsd. t/a	Anzahl Module in Tsd.
NEIN	2.301	1.960	786	6.055
Gesamt	2.677	2.276	913	7.043

Tabelle 4-4: Kennzahlen des gesamtstädtischen, realisierbaren Photovoltaikpotenzials abzüglich der Bestandsanlagen

Subtrahiert man von diesem realisierbaren Potenzial von 2.360 MW_P (2.736 MW_P inklusive denkmalgeschützter Gebäude) die bereits installierte Leistung von 59 MW_P, verbleibt also ein letztlich realisierbares bzw. realistisches Potenzial in Höhe von **2.310 MW_P** (2.677 MW_P inklusive denkmalgeschützter Gebäude).

Die potenzielle Einsparung an Treibhausgasemissionen beträgt bilanziell **786.000 t/a** CO₂-Äquivalente (913.000 t/a CO₂-Äquivalente inklusive denkmalgeschützter Gebäude).

Grundlage der Solarpotenzialanalyse bilden insgesamt 288.902 Bestandsgebäude (zum Zeitpunkt der Befliegung im Jahr 2017) mit einer Gesamt-Dachfläche von etwa 41 Mio. m². In der Solarpotenzialkarte wurden etwa **31 km²** dieser Dachflächen näher untersucht, da diese aufgrund ihres Flächeninhaltes und ihrer Flächengeometrie grundsätzlich für eine Installation von PV-Modulen geeignet sind. Die Analyse der resultierenden Potenzialflächen ergibt folgende Flächenaufteilung der Eignungskategorien:

sehr gut geeignet	3,2 km ²	>= 1.000 kWh / kWp
gut geeignet	12,7 km ²	>= 875; < 1.000 kWh / kWp
bedingt geeignet	7,5 km ²	>= 750; < 875 kWh / kWp
ungeeignet	7,4 km ²	< 750 kWh / kWp

5. Potenzialermittlung Solarthermie

Ziel der Potenzialermittlung ist es, gebäudespezifische Erträge möglicher Solarthermieanlagen zu ermitteln und daraus ein stadtweites Gesamtpotenzial abzuleiten. Dies erfolgte auf Grundlage der berechneten Eignungspolygone bzw. Kollektorflächen.

5.1. Potenzialausweisung für Kollektorflächen

Die berechneten Kollektorflächen je definierter Installationsvariante (siehe Kapitel 3.3.3) enthalten Informationen zu den monats- und jahresweisen Summen an Global-, Diffus- und Direktstrahlung, die auf den jeweiligen Kollektor eintreffen. Auf dieser Grundlage werden kollektorspezifische Erträge im Sinne eines Potenzials ausgewiesen. Das Potenzial beschreibt dabei den Anteil solarer Strahlungsenergie, der über den modellierten Kollektor theoretisch für die Trinkwassererwärmung bzw. Heizungsunterstützung im Gebäude nutzbar ist. Da im Rahmen des Projektes keine konkreten, gebäudescharfen Informationen zur Warmwasser- und Raumwärmenachfrage des Gebäudestandes vorlagen, wurde ein pauschalisierter Ansatz (vereinfachtes Auslegungsverfahren nach VDI 6002⁶) gewählt. Die Potenziale zur Brauchwarmwasserbereitung jedes Kollektors werden zunächst auf den Warmwasserbedarf einer Durchschnittsperson (35 Liter / Tag) bezogen. Die Potenziale zur Heizungsunterstützung werden unter der Annahme der zweifachen Kollektorfläche („Faktor 2 Anlage“), bezogen auf die rein zur Brauchwarmwasserbereitung erforderliche Kollektorfläche, abgebildet. Dies entspricht der gängigen Praxis bei der Auslegung von Solarthermieanlagen im Wohnbereich⁷.

Ausgehend vom Warmwasserbedarf einer Person mit einer zu Grunde gelegten Solltemperatur von 60 °C wird die täglich benötigte Energie zur Warmwasserbereitung (1,9 kWh/d) ermittelt. Demgegenüber steht die solare Strahlungsenergie, die an einem zur Auslegung definierten Sommertag auf dem Kollektor eintrifft. Unter Berücksichtigung eines Systemnutzungsgrads für einen mittleren Julitag ergibt sich nach VDI 6002 die benötigte Kollektorfläche und die Anzahl der Personen, deren Warmwasserbedarf mit gegebener Kollektorfläche unter entsprechenden Annahmen gedeckt werden kann. Ausgehend davon lässt sich zudem über den Faktor 2 – bezogen auf die Kollektorfläche – die Anzahl der Personen überschlägig ermitteln, für die eine Solarthermieanlage zusätzlich zur Wärmebedarfsdeckung beitragen könnte.

⁶ VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, 2014: VDI 6002, Blatt 1, „Solare Trinkwassererwärmung - Allgemeine Grundlagen - Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau“

⁷ Vgl. <https://www.ahornsolar.de/tag/solarthermie/>

Für jeden Kollektor werden über diese Methodik folgende Kennwerte ermittelt:

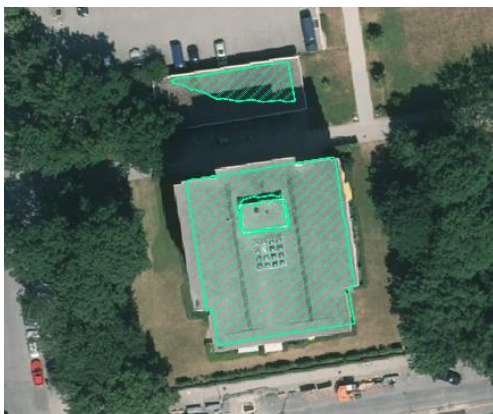
Flächeninhalt	m ²	A_K
Jahresglobalstrahlung, die auf die Kollektorfläche eintrifft	kWh/a	$E_{K,S}$
Brauchwarmwasserbereitstellung für Anzahl an Personen	-	nP_{W_K}
Brauchwarmwasserbereitstellung und Heizungsunterstützung für Anzahl an Personen	-	nP_{WH_K}

Die Ergebnisse können kollektorspezifisch in folgende Eignungskategorien unterteilt werden, um ein qualitatives Maß für die Einordnung (und ggf. Verwendung im Rahmen von Webdiensten) des Kollektorpotenzials zu geben:

ungeeignet	Brauchwarmwasser für < 1 Personen
geeignet	Brauchwarmwasser für ≥ 1 und $\leq 1,5$ Personen
gut geeignet	Brauchwarmwasser für > 1,5 Personen

5.2. Ausweisung von Potenzialflächen

Für jede Installationsvariante von Solarthermieanlagen wurden für jedes Dach Potenzialflächen ermittelt (siehe Kapitel 3.3.1). Über die Summation der Potenziale für Kollektorflächen, die innerhalb dieser Dachflächen liegen, können diesen folgende Kennwerte zugeordnet werden:



Flächeninhalt Potenzialfläche	m ²	A_F
Anzahl geeigneter Kollektoren	-	$n_{K,F}$
Gesamtfläche geeigneter Kollektoren	m ²	$A_{K,F}$
Brauchwarmwasser für Anzahl an Personen	-	nP_{W_F}
Brauchwarmwasser und Heizungsunterstützung für Anzahl an Personen	-	nP_{WH_F}

Zur Berechnung der Kennwerte wurde für Flachdächer die Variante S45 (süd-ausgerichtete, um 45° geneigte Kollektoren) sowie für alle weiteren Dächer die Variante PAR (dachparallele Installation) angenommen. Die Flächen dienen vornehmlich zur Veröffentlichung im Rahmen von interaktiven Online-Kartendiensten.

5.3. Ausweisung des gebäudespezifischen Potenzials

Das Potenzial zur Brauchwarmwasserbereitung und Heizungsunterstützung ist in gleichem Maße von den Solarpotenzialen der Dachfläche sowie von der Nachfrage im jeweiligen Gebäude abhängig. Da im Rahmen des Projektes keine konkreten, gebäudescharfen Informationen zur Warmwasser- und Raumwärmenachfrage (dies beinhaltet auch den energetischen Standard der Gebäude) des Gebäudestandes vorlagen, erfolgte die Potenzialermittlung unter stark vereinfachten Annahmen.

Aus der Gebäudedatei der LH München konnten Nutzungsangaben für alle Bestandsgebäude entnommen werden. Darüber wurden 150.674 Gebäude der insgesamt 288.902 Bestandsgebäude als Wohngebäude bzw. gemischt genutzte Gebäude mit überwiegender Wohnnutzung identifiziert.

Weiterhin konnte über das 3D-Gebäudemodell der LH München das Gebäudevolumen ermittelt werden. Aus diesen Informationen lässt sich für den Wohngebäudebestand eine überschlägige Warmwassernachfrage ermitteln. Grundsätzlich ist der Einsatz der Solarthermie bei weiteren Gebäudenutzungen technisch und wirtschaftlich möglich, beispielsweise in Sportbauten (Brauchwarmwasserbereitung für Duschen) oder in Schwimmbädern (Brauchwarmwasserbereitung für Duschen, Unterstützung der Beckenheizung etc.). Diese Nutzungen weisen jedoch sehr heterogene und individuelle Bedarfsprofile auf, die aus den bestehenden Informationen zu den Bestandsgebäuden nicht (oder nur mit sehr großer Unschärfe) ermittelt werden können. Diese wurden daher nicht im Rahmen der gebäudespezifischen Potenzialausweisung berücksichtigt.

Für die betrachteten Wohngebäude wurde zunächst auf Basis des 3D-Gebäudemodells deren Wohnfläche abgeleitet und daraus die mittlere Anzahl der Personen / Bewohner je Gebäude (nP_G) errechnet, die sich aus der Annahme von 39,0 m² Wohnfläche je Person ergibt⁸.

⁸ Statistisches Amt München, 2019: Die durchschnittliche Wohnfläche in qm pro Einwohner in Wohn- und Nichtwohngebäuden in den Landkreisen der Region 14 in den Jahren 2014 - 2018

Der theoretische jährliche Warmwasserbedarf eines Wohngebäudes (E_{W_G}) ergibt sich aus der Anzahl der Personen multipliziert mit dem angenommenen, täglichen Warmwasserbedarf je Person multipliziert mit 365 Tagen:

$$E_{W_G} = nP_G * 1,19 \text{ kWh/d} * 365 \text{ d}$$

Aus dem Ergebnis der Potenzialausweisung für Kollektorflächen (Kapitel 5.1) ergibt sich über Summation aller geeigneten Kollektoren eines Gebäudes die Anzahl der potenziell solarthermisch mit Warmwasser und Raumwärme zu versorgenden Personen:

$$nP_{W_G} = \sum_{K \in G} nP_{W_K}$$

$$nP_{WH_G} = \sum_{K \in G} nP_{WH_K}$$

Das theoretische Potenzial je Gebäude ergibt sich damit aus der potenziellen Deckung der Nachfrage für Warmwasser:

$$Pot_{W_G} = nP_{W_G} / nP_G$$

Beziehungsweise für Warmwasser und Raumwärme zu:

$$Pot_{WH_G} = nP_{WH_G} / nP_G$$

Werte ≥ 1 für Pot_{W_G} bzw. Pot_{WH_G} stehen dabei für ein nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten vorhandenes Potenzial zur solarthermischen Deckung des Warmwasserbeziehungsweise des Raumwärme- und Warmwasserbedarfes im jeweiligen Gebäude unter den angenommenen Rahmenbedingungen.

Der solare Deckungsanteil des jährlichen Warmwasserbedarfs ($E_{W_{G,S}}$) eines Wohngebäudes ergibt sich aus dem gebäudespezifischen Potenzial (Pot_{W_G}) sowie der gesamten Jahresglobalstrahlung ($E_{K,S}$) auf alle geeigneten Kollektoren und einem angenommenen Systemnutzungsgrad von 30 %:

$$E_{W_{G,S}} = \sum_{K \in G} E_{K,S} / Pot_{W_G} * 0,3$$

Hierüber lässt sich für jedes Gebäude der solare Deckungsgrad (d_{W_s}) zur Trinkwarmwasserbereitung errechnen:

$$d_{W_s} = E_{W_{G,S}} / E_{W_G}$$

Aus dem für die Warmwasserbereitung genutzten Solarertrag wurde die potenzielle Treibhausgasemissionsreduktion durch Solarthermie abgeleitet, unter Annahme eines gängigen Erdgas-Kessels als substituierte Technologie. Dessen wärmebedingte Treibhausgasemissionen wurden mit 275 g / kWh_{th} (CO₂-Äquivalente) angesetzt und über diesen Emissionsfaktor (f_{CO_2}) berücksichtigt. Weiterhin wurde eine Erzeugeraufwandszahl (e) von 1,1 angenommen, um die Anlageneffizienz zu berücksichtigen:

$$THG_{red} W_{G,S} = E_{W_{G,S}} * f_{CO_2} * e$$

5.4. Ausweisung des gesamtstädtischen Potenzials

Das theoretische, gesamtstädtische Potenzial ergibt sich aus der Summe der gebäudespezifischen Potenziale. Dieses übersteigt jedoch das technisch realisierbare Potenzial wesentlich. Zur Abschätzung des technisch realisierbaren Potenzials wurden daher gebäudespezifische sowie pauschalierte Reduktionsfaktoren auf das theoretische Potenzial angewendet. Der theoretisch erzielbare, für die Trinkwarmwasserbereitung nutzbare Solarertrag ($E_{W_{t,Stadt}}$) ergibt sich damit zu:

$$E_{W_{t,Stadt}} = \sum E_{W_{G,S}}$$

Hierbei gehen jedoch nur jene Gebäude in die Summation ein, die nicht unter die Kategorie Denkmalschutz (Einzeldenkmäler und Ensembleschutz) fallen sowie Werte ≥ 1 für Pot_{W_G} aufweisen.

Aus dem theoretischen Potenzial lässt sich über die Anwendung eines Reduktionsfaktors (f_{red}) das realisierbare Potenzial ($E_{W_{r,Stadt}}$) ableiten.

$$E_{W_{r,Stadt}} = E_{W_{t,Stadt}} * f_{red}$$

Der Reduktionsfaktor f_{red} ergibt sich aus den folgenden Einflussgrößen zu:

Reduktion Modellgenauigkeit	-5%
Reduktion Gründächer / anderweitig genutzte Dächer	-5%
Reduktion Dachstatik / Nutzung	-10%
Reduktion gesamt	-20%

Tabelle 5-1: Reduktionsfaktoren zur Anwendung auf das theoretische Solarthermiepotenzial

Aus dem realisierbaren, gesamtstädtischen Potenzial ($E_{W_{r_Stadt}}$) lässt sich die potenzielle Treibhausgasemissionsreduktion durch Solarthermie ableiten, unter Annahme eines gängigen Erdgas-Kessels als Substitutionstechnologie. Dessen wärmebedingte Treibhausgasemissionen wurden mit 275 g / kWh_{th} (CO₂-Äquivalente) angesetzt und über diesen sogenannten Emissionsfaktor (f_{CO_2}) berücksichtigt. Weiterhin wurde eine Erzeugeraufwandszahl (e) von 1,1 angenommen, um die Anlageneffizienz zu berücksichtigen:

$$THGred_{W_{r_Stadt}} = E_{W_{r_Stadt}} * f_{CO_2} * e$$

Die stadtweiten Potenziale der Solarthermie, bezogen auf die Brauchwarmwasserbereitung im Wohngebäudebestand, ergeben sich aus den gebäudespezifischen Potenzialen. Nachstehende Tabelle zeigt die ermittelten theoretischen Potenziale differenziert nach dem Denkmalschutz der betrachteten Bestandsgebäude.

Denkmalschutz	Wohnfläche in Tsd. m ²	Bewohner in Tsd.	Warmwas- serbedarf in GWh/a	nutzbarer Solarertrag in GWh/a	Emissions- reduktion in Tsd. t/a
NEIN	49.500	1.268	883	573	158
JA	12.300	314	219	139	38
Gesamt	61.700	1.582	1.101	713	196

Tabelle 5-2: Kennzahlen des gesamtstädtischen, theoretischen Solarthermiepotenzials zur Brauchwarmwassererwärmung in Wohngebäuden

Der überschlägig ermittelte Warmwasserbedarf der Wohngebäude von 1,1 TWh/a beträgt in etwa 1/6 der Münchner Wärmenachfrage von 6,3 TWh/a⁹, was in etwa der Relation von Raumwärme zu Warmwasser im deutschen Mittel entspricht¹⁰. Der Denkmalschutz betrifft in etwa 20 % des theoretischen Potenzials; der theoretisch nutzbare Solarertrag zur Warmwasserbereitung ausgenommen denkmalgeschützter Gebäude (573 GWh/a) entspricht in etwa 9 % des gesamten Münchner Wärmebedarfs. Das Verhältnis von Warmwasserbedarf (1,1 GWh/a) zu theoretisch nutzbarem Solarwärmeertrag (713 GWh/a) resultiert in einem mittleren solaren Deckungsgrad von 65 %, was relativ hoch – jedoch bei den guten Münchner Verhältnissen über optimierte Anlagen – praktisch realisierbar ist.

Reduziert man die gegebenen Potenziale um 20 % aufgrund der vorhergehend beschriebenen Einflüsse und Unwägbarkeiten des Modells, so ergibt sich ein realisierbares Potenzial im Sinne eines nutzbaren Solarertrages von 459 GWh/a für die Warmwasserbereitung, was etwas über 7 % des Münchner Wärmeverbrauchs entspricht.

Denkmalschutz	nutzbarer Solarertrag in GWh/a	Emissionsreduktion in Tsd. t/a
NEIN	459	126
JA	112	31
Gesamt	570	157

Tabelle 5-3: Kennzahlen des gesamtstädtischen, realisierbaren Solarthermiepotenzials zur Brauchwarmwassererwärmung in Wohngebäuden

⁹ ENIANO und TU München, 2020: Teil-Energienutzungsplan für die Landeshauptstadt München

¹⁰ BDEW, 2019: Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland

6. Anwendungsmöglichkeiten und Ausblick

6.1. Publikation

Die Daten, die im Rahmen dieses Projektes erstellt wurden, reichen von der räumlich detaillierten, monatlich aufgelösten solaren Einstrahlung auf allen Dachflächen Münchens über gebäudespezifische Potenziale bis hin zur stadtweiten Potenzialausweisung. Über die große Bandbreite an Detaillierungsgraden kann ein breites Spektrum von Zielgruppen respektive Nutzern von den erstellten Informationen profitieren.

Die Information über gesamtstädtische Potenziale kann als politische Entscheidungsgrundlage und für die konkrete Ausgestaltung von Förderprogrammen und regulatorischen Rahmenbedingungen genutzt werden. Hierfür sind die Daten gegebenenfalls für die spezifische Fragestellung gesondert zu analysieren und aufzubereiten.

Für die Information der Öffentlichkeit bieten sich interaktive Kartendienste an, welche die solare Einstrahlung auf Dachflächen und die Eignungsflächen mit einer überschlägigen Angabe zum Potenzial darstellen („Solarpotenzialkarte“). Auf diese Weise kann eine Erstinformation zu den möglichen Potenzialen angeboten werden und Motivation zur Nutzung der solaren Ressourcen geschaffen werden.

Weiterhin bietet die detaillierte Datengrundlage Mehrwertinformationen für Planer, die über ebenfalls interaktive Kartendienste bereitgestellt werden kann. Auf Grundlage der Modul- und Kollektordaten kann Funktionalität zum Zusammenfügen von Modulen oder Kollektoren geboten werden, die in der Folge die Berechnung des Stromertrages oder über die Eingabe des Warmwasser- und Raumwärmebedarfs die Ermittlung von solaren Deckungsgraden zur Wärmebereitstellung erlaubt.

6.2. Fortschreibung

Die Solaranalyse basiert im Wesentlichen auf den 3D-Daten der Luftbildbefliegung des Geodatenservice München aus dem Jahr 2017. Die Luftbildbefliegungen werden in zweijährigem Turnus durchgeführt, was eine Aktualisierung der Daten erlaubt. Insbesondere könne hierdurch abgerissene und neu errichtete Gebäude sowie wesentliche Umbaumaßnahmen berücksichtigt werden. Die Befliegung des Jahres 2019 wurde bereits durchgeführt, sie bildet die Stadt bzw. die Vegetation in unbelaubtem Zustand ab. Die nächste Befliegung erfolgt im Jahr 2021, sie wird die Vegetation in belaubtem Zustand abbilden.

6.3. Ausblick

Die Befliegung des Jahres 2019 erfolgte in höherer räumlicher Auflösung und erfasste die Objekte der Erdoberfläche zudem über Schrägaufnahmen, welche eine echte 3D-Abbildung von Objekten erlauben. Dies ermöglicht eine detailliertere Berücksichtigung kleiner Dachaufbauten sowie die Ermittlung von Potenzialen auf Fassadenflächen, was insbesondere für den Ausbau der Photovoltaik relevant ist. Die hochaufgelösten Luftbilddaten bieten überdies die Möglichkeit zur automatisierten Detektion von Objekten auf Dachflächen (über „Maschine Learning“) wie etwa bestehender PV- und Solarthermieanlagen, Dachfenstern, Gauben etc. und können so den Detaillierungsgrad der Modelle weiter erhöhen.

Für den Stadtteil Altaubing wurde auf Basis der 3D-Befliegungsdaten eine Sichtbarkeitsanalyse für Dachflächen zur quantitativen Bewertung der Auswirkungen einer Installation von Photovoltaikmodulen oder Solarthermiekollektoren auf das Stadtbild durchgeführt. Die Analysen erfolgten im Rahmen der Vorbereitenden Untersuchung (VU) für das Sanierungsgebiet über die Münchner Gesellschaft für Stadterneuerung mbH und könnten automatisiert auf das gesamte Stadtgebiet übertragen werden.

Perspektivisch ist eine Bereitstellung von Horizontmasken für beliebige Punkte innerhalb des Münchner 3D-Modells über interaktive Webdienste möglich, was insbesondere Anlagenplanern (PV und ST) die Erfassung vor Ort erspart und damit eine Schnittstelle zu gängigen Planungstools herstellt. Darüber hinaus könnten für jeden Punkt innerhalb Münchens Stundenwerte der Solarstrahlung über einen Webdienst bereitgestellt werden. Diese würden ein breites Spektrum an Fachplanern unterschiedlicher Disziplinen bedienen und die Optimierung der solaren Energienutzung in München fördern. Zum einen betrifft dies die bauphysikalische Optimierung von Gebäuden hinsichtlich einer optimalen Nutzung solarer Gewinne im Sommer, des sommerlichen Wärmeschutzes aber auch der optimierten Tageslichtnutzung in Innenräumen. Zum anderen kann die Planung von Photovoltaikanlagen auf Fassaden unterstützt werden und durch die zeitlich hohe Auflösung Fragestellungen der Eigenstromnutzung, der Dimensionierung von Speichern oder der Integration von solarer Elektromobilität bearbeitet werden. Weiterhin bilden diese Informationen die Grundlage zur Evaluation stadtklimatischer (z.B. Wärmeeintrag über Fassaden) und stadtbioologischer (Fassadenbegrünung) Fragestellungen.

7. Beschreibung der Abgabedatensätze

7.1. Modul- und Kollektorflächen

Die Daten zu Modul- und Kollektorflächen (3D-Polygone) sind in einer SpatialLite-Datenbank gespeichert, im Koordinatenreferenzsystem EPSG:25832. Folgende Dateien enthalten die dargestellten Installationsvarianten:

<i>Variante</i>	<i>Technologie</i>	<i>Datei</i>
PAR	PV	module_par_pv.sqlite
PAR	ST	kollektoren_par_st.sqlite
O/W10	PV	module_ow10_pv.sqlite
S30	PV	module_s30_pv.sqlite
S45	ST	kollektoren_s45_st.sqlite

Zu jeder Modul- / Kollektorfläche (Polygone) sind dabei folgende Attribute hinterlegt:

<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Dimension</i>	<i>Beschreibung</i>
id	INTEGER	-	Eindeutige ID des Moduls / Kollektors
gid	INTEGER	-	ID des Gebäudes des 3D-Stadtmodells
az	FLOAT	rad	Azimuthwinkel (Ausrichtung des Normalenvektors gegenüber Nord)
el	FLOAT	rad	Elevationswinkel (Neigung des Normalenvektors gegenüber horizontaler Ebene)
width	FLOAT	m	Breite
height	FLOAT	m	Höhe
area	FLOAT	m ²	Flächeninhalt
global	FLOAT	kWh/a	Jahresglobalstrahlung auf Modul / Kollektor
dir1 ... dir12	FLOAT	kWh/m ² a	spezifische Direktstrahlung für die Monate Januar bis Dezember (Attribute dir1 bis dir12) auf Modul / Kollektor
dif1 ... dif12	FLOAT	kWh/m ² a	spezifische Diffusstrahlung für die Monate Januar bis Dezember (Attribute dif1 bis dif12) auf Modul

Für Modulflächen (PV) werden folgende zusätzliche Attribute ausgewiesen:

<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Dimension</i>	<i>Beschreibung</i>
p_peak	FLOAT	kW _P	installierbare Peakleistung
e_ac	FLOAT	kWh/a	Jahresstromertrag (AC)
co2_red	FLOAT	kg/a	Vermiedene CO ₂ -Emissionen

Für Kollektorflächen (ST) werden folgende zusätzliche Attribute ausgewiesen:

<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Dimension</i>	<i>Beschreibung</i>
n_pers_ww	FLOAT	-	Anzahl Personen, deren jährlicher Warmwasserbedarf über den Kollektor teilgedeckt werden könnte
n_pers_ww_hw	FLOAT	-	Anzahl Personen, deren jährlicher Warmwasser- und Raumwärmebedarf über den Kollektor teilgedeckt werden könnte

7.2. Gebäudepotenziale

Die Daten zu Gebäudepotenzialen basieren auf den Gebäudeumrissen der Stadtgrundkarte (2D-Polygone) und sind in einer SpatialLite-Datenbank gespeichert, im Koordinatenreferenzsystem EPSG:25832. Die Datei „gebaeudepotenzial_pv.sqlite“ enthält die gebäudeweisen Potenziale zum Ausbau der Photovoltaik mit folgenden Attributen:

<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Dimension</i>	<i>Beschreibung</i>
gid	INTEGER	-	ID des Gebäudes des 3D-Stadtmodells
denkmalschutz	BOOLEAN	-	Gibt an, ob das Objekt denkmalgeschützt ist (Einzeldenkmal und / oder Ensembleschutz), Denkmalschutz = TRUE
p_peak	FLOAT	kW _P	Gesamte installierbare Peakleistung
e_ac	FLOAT	kWh/a	Ertrag
co2_red	FLOAT	kg/a	Reduktion der CO ₂ -Emissionen gegenüber Strommix
n_modules	INTEGER	-	Anzahl der theoretisch installierbaren Module

Die Datei „gebaeudepotenzial_st.sqlite“ enthält die gebäudeweisen Potenziale, beschränkt auf identifizierte Wohngebäude, zum Ausbau der Solarthermie mit folgenden Attributen:

<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Dimension</i>	<i>Beschreibung</i>
gid	INTEGER	-	ID des Gebäudes des 3D-Stadtmodells
denkmalschutz	BOOLEAN	-	Gibt an, ob das Objekt denkmalgeschützt ist (Einzeldenkmal und / oder Ensembleschutz), TRUE = Denkmalschutz
n_pers	INTEGER	-	aus der Wohnfläche abgeleitete Anzahl der Bewohner (39 m ² / Pers.)
ww_demand	FLOAT	kWh/a	aus der Zahl der Personen abgeleiteter Warmwasserbedarf nach VDI 6002
n_pers_ww	FLOAT	-	Anzahl der Personen, deren Warmwasserbedarf über alle Kollektoren auf der Dachfläche gedeckt werden könnte (nach VDI 6002)
n_pers_ww_hw	FLOAT	-	Anzahl der Personen, deren Warmwasserbedarf sowie der Raumwärmebedarf („Faktor 2 Anlage“) über alle Kollektoren auf der Dachfläche gedeckt werden könnte (WW nach VDI 6002)
e_sol_ww	FLOAT	kWh/a	Nutzbarer Solarertrag zur Warmwasserbereitung
e_sol_ww_hw	FLOAT	kWh/a	Nutzbarer Solarertrag zur Warmwasserbereitung und Raumwärmebereitstellung
co2_sol_ww	FLOAT	kg/a	Reduktion der jährlichen Treibhausgasemissionen (CO ₂ -Äquiv.) über solare Warmwasserbereitung
co2_sol_ww_hw	FLOAT	kg/a	Reduktion der jährlichen Treibhausgasemissionen (CO ₂ -Äquiv.) über solare Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung

7.3. Potenzialflächen

Die Daten zu Potenzialflächen (2D-Polygone) sind in einer SpatiaLite-Datenbank gespeichert, im Koordinatenreferenzsystem EPSG:25832. Folgende Dateien enthalten die dargestellten Installationsvarianten:

<i>Variante</i>	<i>Technologie</i>	<i>Datei</i>
PAR	PV	potenzialflaechen_par_pv.sqlite
PAR	ST	potenzialflaechen_par_st.sqlite
O/W10	PV	potenzialflaechen_ow10_pv.sqlite
S30	PV	potenzialflaechen_s30_pv.sqlite
S45	ST	potenzialflaechen_s45_st.sqlite

Zu jedem Polygonobjekt sind folgende Attribute hinterlegt:

<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Dimension</i>	<i>Beschreibung</i>
id	INTEGER	-	Eindeutige ID der Potenzialfläche
gid	INTEGER	-	ID des Gebäudes des 3D-Stadtmodells
az	FLOAT	rad	Azimuthwinkel (Ausrichtung des Normalenvektors gegenüber Nord)
el	FLOAT	rad	Elevationswinkel (Neigung des Normalenvektors gegenüber horizontaler Ebene)
area	FLOAT	m ²	Flächeninhalt
global	FLOAT	kWh/a	Jahresglobalstrahlung
dir1 ... dir12	FLOAT	kWh	Direktstrahlung für die Monate Januar bis Dezember (Attribute dir1 bis dir12)
dif1 ... dif12	FLOAT	kWh	Diffusstrahlung für die Monate Januar bis Dezember (Attribute dif1 bis dif12)

Für Polygonobjekte mit Technologie PV werden folgende zusätzliche Attribute ausgewiesen:

<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Dimension</i>	<i>Beschreibung</i>															
p_peak	FLOAT	kW _p	installierbare Peakleistung															
e_ac	FLOAT	kWh/a	Jahresstromertrag (AC)															
co2_red	FLOAT	kg/a	Vermiedene CO ₂ -Emissionen															
n_module	INTEGER	-	Anzahl Module in Eignungsfläche															
a_module	FLOAT	m ²	Gesamtfläche Module in Eignungsfläche															
category	INTEGER	-	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Eignung</td> <td>kWh/kWp</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>sehr gut geeignet</td> <td>>= 1.000</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>gut geeignet</td> <td>>= 875; < 1.000</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>bedingt geeignet</td> <td>>= 750; < 875</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>ungeeignet</td> <td>< 875</td> </tr> </table>		Eignung	kWh/kWp	1	sehr gut geeignet	>= 1.000	2	gut geeignet	>= 875; < 1.000	3	bedingt geeignet	>= 750; < 875	0	ungeeignet	< 875
	Eignung	kWh/kWp																
1	sehr gut geeignet	>= 1.000																
2	gut geeignet	>= 875; < 1.000																
3	bedingt geeignet	>= 750; < 875																
0	ungeeignet	< 875																

Für Polygonobjekte mit Technologie ST werden folgende zusätzliche Attribute ausgewiesen:

<i>Attribut</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Dimension</i>	<i>Beschreibung</i>												
n_pers_ww	FLOAT	-	Anzahl Personen, deren jährlicher Warmwasserbedarf über den Kollektor teilgedeckt werden könnte												
n_pers_ww_hw	FLOAT	-	Anzahl Personen, deren jährlicher Warmwasser- und Raumwärmebedarf über den Kollektor teilgedeckt werden könnte												
n_kollektor	INTEGER	-	Anzahl Kollektoren in Eignungsfläche												
a_kollektor	FLOAT	m ²	Gesamtfläche Kollektoren in Eignungsfläche												
category	INTEGER	-	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>Eignung</td> <td>kWh/(m² a)</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>sehr gut geeignet</td> <td>>= 1.147</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>geeignet</td> <td>>= 945; < 1.147</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>ungeeignet</td> <td>< 945</td> </tr> </table>		Eignung	kWh/(m² a)	1	sehr gut geeignet	>= 1.147	2	geeignet	>= 945; < 1.147	0	ungeeignet	< 945
	Eignung	kWh/(m² a)													
1	sehr gut geeignet	>= 1.147													
2	geeignet	>= 945; < 1.147													
0	ungeeignet	< 945													

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Monatliche Werte der Direkt- und Diffusstrahlung auf die horizontale Ebene am Standort München.....	4
Abbildung 3-1: Definition der Analysehöhen über Dachhaut	7
Abbildung 3-2: Luftbild des Beispielgebäudes zur Veranschaulichung von Analysemethodik und Ergebnissen	10
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung von Verschattungswinkel und Modulreihenabstand	14
Abbildung 3-4: Beispielhafte Darstellung von Eignungsflächen und Solarmodulen im Einfamilienhausbestand.....	15
Abbildung 3-5: Beispielhafte 3D-Darstellung von Modulen auf 3D-Gebäudemodell	15
Abbildung 3-6: Schematische Darstellung von Verschattungswinkel und Kollektorreihenabstand	17
Abbildung 4-1: Jährlicher Stromertrag des realisierbaren Photovoltaikpotenzials, differenziert nach denkmalgeschützten und nicht denkmalgeschützten Gebäuden	23

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Kennzahlen der betrachteten Varianten zur Einstrahlungsanalyse	7
Tabelle 3-2: Kennzahlen der betrachteten Varianten und entsprechender Grenzwerte zur Ermittlung von Potenzialflächen.....	13
Tabelle 3-3: Kennzahlen der betrachteten Modulvarianten zur Ermittlung des Photovoltaikpotenzials	14
Tabelle 3-4: Kennzahlen der betrachteten Kollektorvarianten zur Ermittlung des Solarthermiepotenzials	17
Tabelle 4-1: Reduktionsfaktoren zur Anwendung auf das theoretische Photovoltaikpotenzial	22
Tabelle 4-2: Kennzahlen des gesamtstädtischen, theoretischen Photovoltaikpotenzials.....	22
Tabelle 4-3: Kennzahlen des gesamtstädtischen, realisierbaren Photovoltaikpotenzials.....	23
Tabelle 4-4: Kennzahlen des gesamtstädtischen, realisierbaren Photovoltaikpotenzials abzüglich der Bestandsanlagen	23
Tabelle 5-1: Reduktionsfaktoren zur Anwendung auf das theoretische Solarthermiepotenzial.....	30
Tabelle 5-2: Kennzahlen des gesamtstädtischen, theoretischen Solarthermiepotenzials zur Brauchwarmwassererwärmung in Wohngebäuden	30
Tabelle 5-3: Kennzahlen des gesamtstädtischen, realisierbaren Solarthermiepotenzials zur Brauchwarmwassererwärmung in Wohngebäuden	31