

Wie viel Photovoltaik sollte auf dem Dach des Rathauses West in Karlsruhe installiert werden und welche Art von Modulen?

Karlsruher Institut für Technologie

Seminararbeit im Rahmen des Seminars "Mehr Photovoltaik = Weniger Denkmalschutz?"

von Kira Layer

Betreuer: Andreas Seebacher¹, Marius Albiez¹, Volker Stelzer¹

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 260



(1) Angaben zur Affiliation wie folgt:

¹ Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

(2) Angaben zum Projekt:

Diese Publikation ist entstanden im Rahmen des Projektes "Karlsruher Reallabor Nachhaltiger Klimaschutz (KARLA)" am Karlsruher Transformationszentrum für Nachhaltigkeit und Kulturwandel (KAT) und wurde gefördert vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (MWK).

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
www.kit.edu



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

2024

ISSN: 2194-1629

Zusammenfassung

Photovoltaik sorgt für Interessenskonflikte zwischen Klimaschutz, Versorgungssicherheit, Kosten und teilweise auch Denkmalschutz. In dieser Hausarbeit wird diskutiert, ob es sinnvoll ist, eine Photovoltaikanlage auf dem denkmalgeschützen Rathaus West in Karlsruhe zu installieren und welche Anforderungen sie bezüglich Optik, Ort der Anbringung und Größe erfüllen sollte. Dafür werden verschiedene Module betrachtet und der Jahresertrag einer möglichen aus diesen Modulen bestehenden Anlage auf dem Rathaus West berechnet. Auch der Preis der Module und ihre Eignung für das denkmalgeschützte Gebäude werden miteinbezogen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	4
2 Methodik	5
3 Denkmalschutz aus Perspektive der Nachhaltigen Entwicklung	6
4 Photovoltaik aus Perspektive der Nachhaltigen Entwicklung	7
5 Wovon hängt der Jahresertrag einer Photovoltaikanlage ab?	8
5.1 Solare Strahlung	9
5.2 Neigungswinkel und Ausrichtung	10
5.3 Installierte Peak-Leistung	16
5.4 Wechselrichter und andere Verluste	16
6 Welche Photovoltaik-Module sind für das Rathaus West geeignet?	17
6.1 Wie kann eine Photovoltaikanlage die Anforderungen des Denkmalschutzes erfüllen?	17
6.2 Beschreibung des Rathaus West	18
6.3 Beispiel-Module für das Rathaus West	21
7 Berechnung des Jahresertrags einer Photovoltaikanlage auf dem Rathaus West und der zugehörigen Preise	23
7.1 Methodik der Berechnungen	23
7.2 Ergebnisse	26
8 Fazit und Diskussion	28
8.1 Fazit	28
8.2 Grenzen dieser Arbeit	31
8.3 Ausblick	32

1 Einleitung

In dieser Hausarbeit soll diskutiert werden, ob es sinnvoll ist, eine Photovoltaikanlage auf dem Rathaus West in Karlsruhe zu installieren und welche Anforderungen sie bezüglich Optik, Ort der Anbringung und Größe erfüllen sollte. Doch warum überhaupt diese Frage?

Nachhaltige Entwicklung umfasst nicht nur Klimaschutz, sondern alles, was wichtig ist, „um heute und in Zukunft ein gutes Leben führen zu können“ [27]. Das heißt, bei der Frage nach mehr Photovoltaik geht es um viel mehr als nur das Klima:

Photovoltaik erst einmal herzustellen und zu installieren, kostet Geld. Doch Geld steht nie unbegrenzt zur Verfügung, also muss immer überlegt werden, wie das vorhandene Geld am besten eingesetzt werden kann, um das gute Leben zu ermöglichen.[28] Also vielleicht gar keine Photovoltaikanlagen mehr bauen, sondern lieber Sozialwohnungen?

Das würde aber dann entweder dem Klimaschutz widersprechen (wenn stattdessen fossiler Strom erzeugt wird) oder der Versorgungssicherheit (wenn stattdessen gar kein Strom erzeugt wird, beziehungsweise wenn nur dann Strom erzeugt wird, wenn es Wind gibt). Photovoltaikanlagen sind also ein wichtiger Bestandteil der Energiewende, siehe [23], S. 195.

Außerdem könnte die Stadt Karlsruhe durch mehr Photovoltaikanlagen ein Vorbild für die Energiewende sein. Andererseits gibt es aber Einschränkungen durch die Denkmalschutzbestimmungen. Eine auf einem denkmalgeschützten Dach installierte Photovoltaikanlage kann das Bild des Gebäudes sehr verändern. Weniger auffällige Solarmodule sind meist teurer und verhindern es somit, die Kosten gering zu halten.

Es gibt also einen Interessenskonflikt zwischen Klimaschutz, Versorgungssicherheit, Vorbildfunktion und Kosten. Bei 3% der Gebäude in Baden-Württemberg kommt zusätzlich Denkmalschutz zum Konflikt hinzu.

Das Rathaus West, siehe Abb. 1, ist seit 1980 eines dieser denkmalgeschützten Gebäude. Es wurde Ende des 19. Jahrhunderts gebaut und war anfangs ein Gebäude der Karlsruher Lebensversicherung.[16]

Für die Beantwortung der Frage nach Photovoltaik auf diesem Gebäude, wer-



Abbildung 1: Rathaus West, Quelle: [21]

den verschiedene Module betrachtet. Ich werde den Jahresertrag einer aus diesen Modulen bestehenden Anlage auf dem Rathaus West berechnen, aber auch den Preis der Module und ihre Eignung für das denkmalgeschützte Gebäude miteinbeziehen.

Im Folgenden wird zuerst die Methodik der Hausarbeit beschreiben, siehe Kapitel 2. Anschließend wird in Kapitel 3 und 4, um den Interessenskonflikt noch besser darzustellen, genauer auf die Themen Denkmalschutz und Photovoltaik im Kontext der Nachhaltigen Entwicklung eingegangen. In Kapitel 5 wird erklärt, wovon der Jahresertrag abhängt, und wie er im Allgemeinen berechnet werden kann. Danach werden Beispiel-Module angegeben, die den Anforderungen des Denkmalschutzes gerecht werden könnten und die Auswahl begründet, siehe Kapitel 6. Die Jahreserträge der ausgewählten Module und die zugehörigen Preise für das Rathaus West sind in Kapitel 7 zu finden. Abschließend wird ein Fazit gezogen, es werden die Grenzen der Arbeit diskutiert und ein Ausblick gegeben, siehe Kapitel 8.

2 Methodik

Für diese Hausarbeit wurde eine Recherche zum Thema Denkmalschutz und dessen Leitlinien gemacht. Auch zu den Einflussfaktoren auf den Jahresertrag

einer Photovoltaikanlage wurde eine Recherche durchgeführt. Des weiteren wurde das Integrative Konzept zur Nachhaltigen Entwicklung [27] genutzt, um den in Abschnitt 1 genannten Interessenskonflikt abzuwägen. Für die Auswahl von passenden Photovoltaik-Modulen wurden die Ergebnisse der Projektarbeit [24] verwendet.

Die Berechnung des Jahresertrags der ausgewählten Module für verschiedene Dachflächen wurde mit Hilfe eines Dachflächenrechners und mit Hilfe des Online-Photovoltaik-Rechners [9] umgesetzt. Das genaue Vorgehen ist im Abschnitt 7.1 beschrieben.

3 Denkmalschutz aus Perspektive der Nachhaltigen Entwicklung

Das Anliegen des Denkmalschutzes ist es, im öffentlichen Interesse stehende Gebäude, Ensembles, Parklandschaften; oder ähnliches zu erhalten. Dieses öffentliche Interesse kann historisch, künstlerisch, wissenschaftlich, technikgeschichtlich oder städtebaulich begründet sein.[7]

Nach der Deutschen Stiftung Denkmalschutz sind Denkmäler „mehr als nur Steine: Sie stiften Identität, prägen das Werteempfinden, sind lebendige Orte der Erinnerung, Wahrzeichen, Mahnmale oder Zufluchtsorte und verbinden Menschen grenzübergreifend“ [5]. Weiter ist der Denkmalschutz auch Bestandteil der deutschen Länderverfassungen [7].

Außerdem ist im Integrativen Konzept Nachhaltiger Entwicklung (IKoNE) [27] eine Regel zu finden, die Denkmalschutz als wichtigen Bestandteil der Nachhaltigen Entwicklung einstuft. In der *Regel 3.3 Kulturelles Erbe und kulturelle Vielfalt erhalten* heißt es: „Kultur ist eine sehr wichtige Quelle schöpferischer Kraft und ist deshalb in ihrer Vielfalt zu erhalten.“ [27] Genauso ist Denkmalschutz auch im Unterziel 11.4 der Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen enthalten: *SDG 11.4 Strengthen efforts to protect and safeguard the world’s cultural and natural heritage.*[29]

4 Photovoltaik aus Perspektive der Nachhaltigen Entwicklung

Wie schon in der Einleitung geschrieben, sorgt Photovoltaik für Interessenskonflikte zwischen Klimaschutz, Versorgungssicherheit, Vorbildfunktion, Kosten und teilweise Denkmalschutz.

Es ist offensichtlich, dass Klimaschutz ein Bestandteil nachhaltiger Entwicklung ist. Auch mehrere substanzelle Regeln des IKoNE unterstützen dies:

Die Regel *2.3 Umwelt nutzen, ohne ihrer Aufnahmefähigkeit für schädliche Stoffe und Abwärme zu schaden* fordert, die Klimakrise zu verhindern. Es sollen nicht mehr Treibhausgase ausgestoßen werden, als durch die Natur wieder gebunden werden können. Daraus lässt sich schließen, dass unter Anderem möglichst wenig Energie aus Kohle, Gas und Öl gewonnen werden soll und damit mehr Energie aus erneuerbaren Energien, wie Photovoltaik. Außerdem gibt es noch fünf weitere Regeln, die für Klimaschutz und damit für den Photovoltaikausbau sprechen. Regel *1.1 Menschliche Gesundheit schützen* gehört dazu, da die Klimaerwärmung unter anderem für Hungersnöte, Herz-Kreislauf-Probleme aufgrund von Hitzewellen, andere gesundheitsschädigende Extremwetterereignisse, vermehrte Borreliose-Erkrankungen aufgrund der Ausbreitung von Zecken und verlängerte Pollenflugzeiten verantwortlich sein wird [12]. Wegen dem mit dem Klimawandel einhergehenden Artensterben (siehe [23], S.27) sind auch die Regeln *1.4 Gleiche Möglichkeiten der Nutzung der Umwelt für alle Menschen* und *3.4 Natur und Landschaft als Kulturgüter erhalten* in diese Kategorie einzurordnen. Da wir am Ende der Nahrungskette stehen, hat das Artensterben einen Einfluss auf die Lebensmittelproduktion, sodass zukünftige Generationen nicht mehr die gleichen Ressourcen der Umwelt dafür zur Verfügung haben [23]. Daraus folgt, dass Lebensmittel teurer werden. Das belastet vor allem ärmere Menschen, die einen größeren Teil ihres Einkommens für Essen ausgeben [25]. Deshalb ist auch Regel *1.5 Übersteigerte Einkommens- und Vermögensunterschiede ausgleichen* ein Grund für wirksamen Klimaschutz, also unter Anderem Photovoltaik-Ausbau. Da aus Armut zum Beispiel schlechterer Zugang zu Bildung folgt [26], ist auch fehlende Chancengleichheit bei Bildung eine Folge der Klimakrise. Das heißt Regel *3.1 Chancengleichheit bei*

Bildung, Beruf, Ämtern und Information ermöglichen ist eine weitere Regel in der Kategorie Klimaschutz.

Ebenfalls lässt sich die in der Einleitung erwähnte Versorgungssicherheit aus dem IKoNE ableiten. Regel *1.2 Grundversorgung sicherstellen* besagt, dass jeder existentiell wichtige Dinge, wie Nahrung oder Wohnung zur Verfügung haben sollte. In unserer Gesellschaft ist das nur mit einer sicheren Stromversorgung möglich, weshalb es ausreichend Kraftwerke, z.B. Photovoltaikanlagen, geben sollte.

Auch die Kosten lassen sich im IKoNE finden. Regel *2.5 Sachwerte sowie Fähigkeiten und Wissen nachhaltig entwickeln* umfasst unter anderem, dass den nächsten Generationen keine Schulden hinterlassen werden, sondern „ein Erbe [...], das ihnen die Möglichkeit gibt, selbst zu wirtschaften und sich selbst zu versorgen“ [27] Nach dieser Regel dürfen also keine unbegründet teuren Photovoltaikanlagen genutzt werden. Dabei ist aber zu beachten, dass sich Photovoltaikanlagen amortisieren und nach einigen Jahren sogar Geld einbringen können, und dass auch Klimafolgeschäden zu Schulden führen können, siehe [23], S.200-202. Da Photovoltaikanlagen eine beschränkte Lebenszeit haben, spielt zusätzlich das Recycling der Anlagen und damit die Regel *2.1 Erneuerbare Rohstoffe und Energiequellen nachhaltig nutzen* eine Rolle [8]. Auch der im letzten Abschnitt erklärte Denkmalschutz, kann bei Photovoltaikanlagen eine Rolle spielen.

Diese neun Regeln müssen also bei der Entscheidung für oder gegen eine Photovoltaikanlage aus Perspektive der Nachhaltigkeit beachtet werden.

Auch bei den SDGs gibt es zu Photovoltaik passende Ziele, zum Beispiel *SDG 7 Affordable and clean energy.* [29]

5 Wovon hängt der Jahresertrag einer Photovoltaikanlage ab?

Der Jahresertrag einer Photovoltaikanlage hängt nicht nur von der installierten Leistung ab, sondern auch vom Strahlungsangebot der Sonne am gewählten Standort, von der Dachneigung und der Ausrichtung der Anlage zur Sonne und von Energieverlusten (zum Beispiel durch Wechselrichter). In den folgenden

Abschnitten werden diese Effekte genauer erklärt. Dabei wird sich hauptsächlich auf die Quellen [22] und [17] bezogen.

5.1 Solare Strahlung

Da Photovoltaikanlagen die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umwandeln, hängt ihr Jahresertrag von der einfallenden solaren Strahlung, dem Strahlungsfluss W , ab. In diesem Abschnitt wird erklärt, woher die Strahlungsenergie kommt und wie viel Leistung tatsächlich auf dem Dach des Rathauses West ankommt.

Die Strahlungsenergie ist die Energie, die durch Kernfusions-Vorgänge der Sonne frei wird. Sie wird mittels elektromagnetischer Wellen von der Sonne zur Erde transportiert. Die Wellenlängen der elektromagnetischen Wellen reichen von weniger als $0,001 \mu m$ (Gammastrahlung) über $0,38 - 0,78 \mu m$ (sichtbares Licht) bis zu $10 km$ (Langwellen). Eine kürzere Wellenlänge führt (nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz) dazu, dass die Strahlung energiereicher ist. Das heißt, das Spektrum der Wellenlängen hängt von der Oberflächentemperatur des strahlenden Körpers ab. [17] (S.204-207)

Die Strahlungsleistung der Sonne beträgt $3,845 \cdot 10^{26} W$. Diese wird in alle Richtungen verteilt ausgestrahlt, sodass am oberen Ende der Atmosphäre der Erde ca. $1367 W/m^2$ auf eine senkrecht zur Strahlung stehenden Fläche ankommen. Obwohl sich dieser Wert aufgrund der Variation des Abstands zwischen Sonne und Erde im Laufe eines Jahres und aufgrund des Sonnenfleckencyklus leicht ändert, wird er Solarkonstante genannt. [17] (S. 214)

Auf dem Erdboden kommt jedoch nicht alles dieser Leistung an: An einem wolkenlosen Tag sind es ca. $1000 W/m^2$, an einem bedeckten Tag noch weniger. Der Grund dafür ist die Abschwächung der Sonnenstrahlung durch Reflexion, Absorption und Streuung in der Atmosphäre. [22] Reflexion ist das Zurückwerfen eintreffender Strahlung, wodurch die Energie wieder zurückgeführt wird. Absorption bedeutet, dass die Strahlung von Teilchen aufgenommen und zum Beispiel in Wärme umgewandelt wird. Das heißt, dabei wird die Energie nicht abgeführt. Die Streuung an Luft- oder Dunstpartikeln löst Richtungsänderungen der Strahlen aus. Dadurch wird die Strahlung in Ursprungsrichtung abgeschwächt.

[17]

Es verbleiben 61 % der Strahlung, die auf dem Weg zur Erdoberfläche durch keinen der drei Effekte abgeschwächt werden. Dieser Anteil wird Direktstrahlung, der gestreute Anteil der Strahlung wird diffuse Strahlung genannt. Insgesamt kommt dann die Summe aus Direktstrahlung und diffuser Strahlung, auch Globalstrahlung genannt, am Erdboden an. In den meisten Teilen Deutschlands, vor allem in Süddeutschland, wird die Globalstrahlung in den Sommermonaten von der Direktstrahlung dominiert. In den Wintermonaten kommt in Deutschland etwa gleich viel Energie durch diffuse und direkte Strahlung an. Diese Effekte sind in Abb. 2-5 zu sehen und können durch den Sonnenstand erklärt werden. Die Sonne steht in Süddeutschland höher als in Norddeutschland und im Sommer höher als im Winter. Außerdem beeinflusst der Sonnenstand hauptsächlich die Direktstrahlung. Wenn die Sonne hoch steht, ist der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre kürzer. Dadurch wird die Strahlung weniger durch Reflexion, Streuung und Absorption abgeschwächt. Des Weiteren liefert die direkte Strahlung bei senkrecht einfallender Sonnenstrahlung mehr Energie pro Fläche als bei einem tieferen Sonnenstand, siehe Abschnitt 5.2. [22]

Wie viel Sonnenstrahlung auf der Erde ankommt und somit von einer Photovoltaikanlage genutzt werden kann, hängt also nicht nur von der Bewölkung ab, sondern auch vom Sonnenstand und damit von Standort und Jahreszeit. Die jährliche Globalstrahlung in Deutschland ist in Abb. 6 dargestellt. In dieser Abbildung ist auch zu erkennen, dass Karlsruhe mit $1300 - 1320 \text{ kWh/m}^2$ über dem deutschen Mittel liegt. Hinzu kommt allerdings noch Verschattung, zum Beispiel durch umliegende Gebäude oder Bäume.

5.2 Neigungswinkel und Ausrichtung

Die auf eine geneigte Fläche, zum Beispiel auf ein Photovoltaik-Modul, auftreffende Strahlung setzt sich aus direkter, diffuser und vom Boden reflektierter Energie zusammen. Die Strahlungsflussdichte E ist als Strahlungsfluss pro Fläche definiert und hat damit die Einheit $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Die Strahlungsflussdichte der direkten Strahlung E_{direkt} auf senkrecht zur Strah-

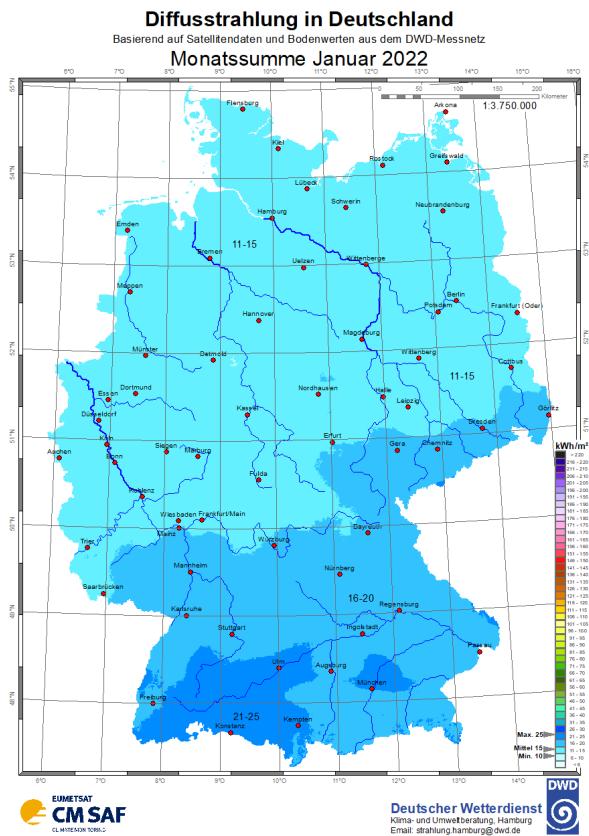


Abbildung 2: Monatssumme der diffusen Strahlung in Deutschland für Januar 2022, Quelle: [6]

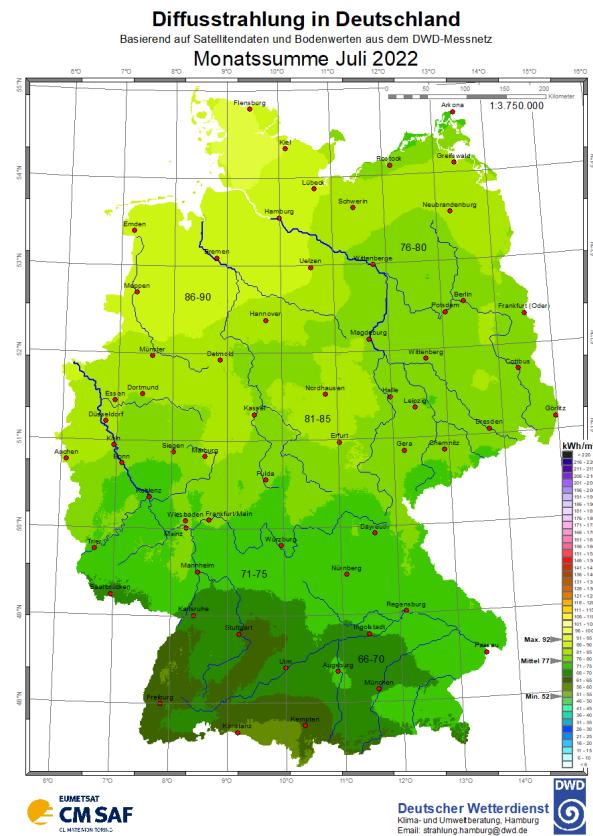


Abbildung 3: Monatssumme der diffusen Strahlung in Deutschland für Juli 2022, Quelle: [6]

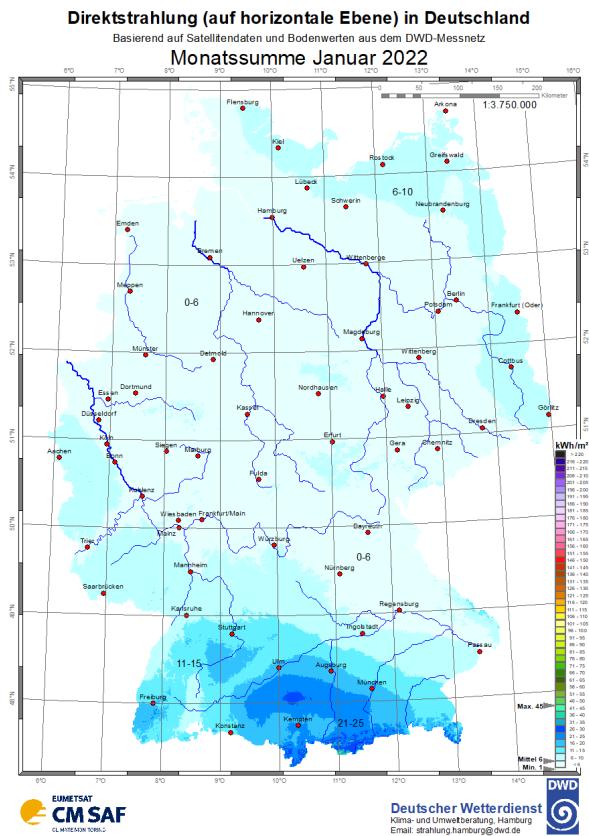


Abbildung 4: Monatssumme der Direktstrahlung in Deutschland für Januar 2022, Quelle: [6]

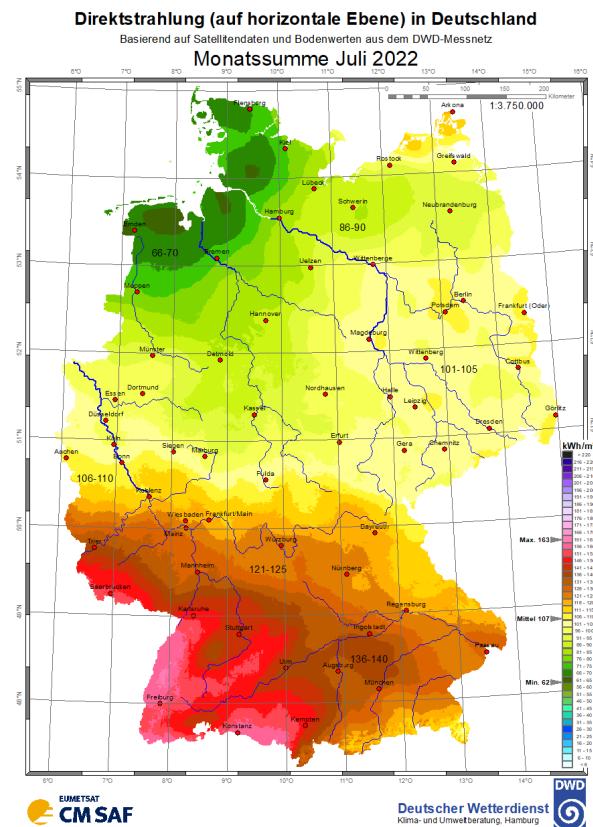


Abbildung 5: Monatssumme der Direktstrahlung in Deutschland für Juli 2022, Quelle: [6]

Globalstrahlung in Deutschland

Basierend auf Satellitendaten und Bodenwerte aus dem DWD-Messnetz

Jahressumme 2022

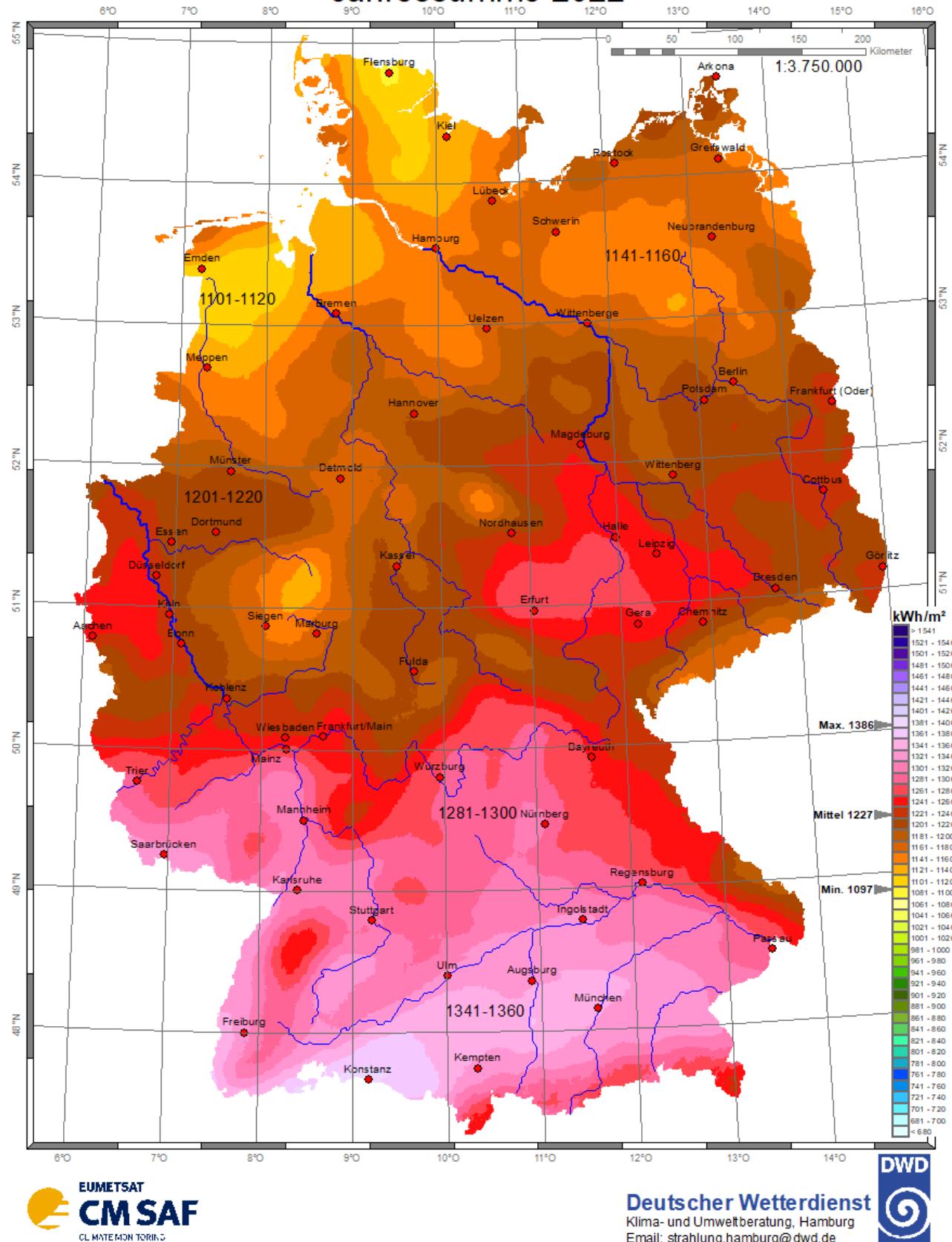


Abbildung 6: Jahressumme der Globalstrahlung 2022, Quelle: [6].

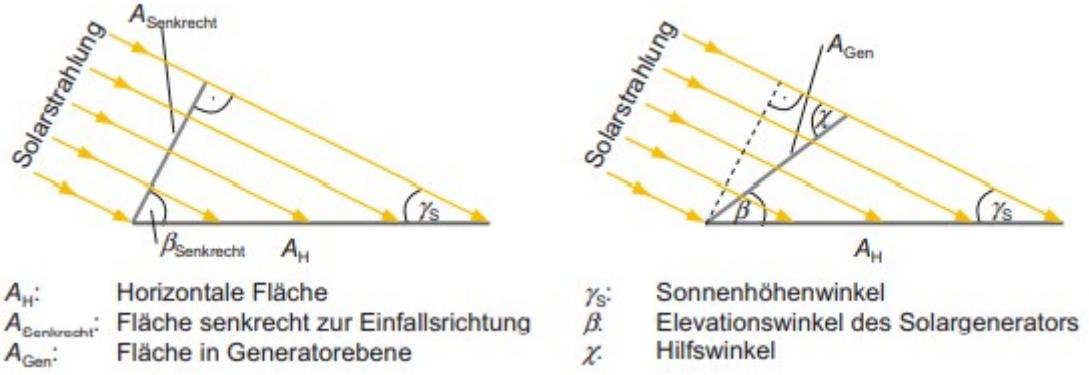


Abbildung 7: Einfluss der Neigung einer Fläche auf die direkte Strahlung, Quelle [22].

lung stehenden Flächen ist höher, als auf Flächen in einem anderen Winkel, siehe Abb. 7. Wir betrachten, wie in dieser Abb., einen Sonnenhöhenwinkel γ_s , einen Winkel β der Photovoltaikanlage und die Flächen $A_{\text{senkrecht}}$ (senkrecht zur Strahlung), A_{Gen} (Fläche der Photovoltaikanlage) und A_H (horizontale Fläche), sodass auf allen drei Flächen der gleiche Strahlungsfluss F aufgenommen werden kann. Damit erhalten wir

$$F = E_{\text{direkt},H} \cdot A_H = E_{\text{direkt},\text{Gen}} \cdot A_{\text{Gen}} = E_{\text{direkt},\text{senkrecht}} \cdot A_{\text{senkrecht}}. \quad (1)$$

Da sich der Sinus eines Winkels durch den Quotienten aus Gegenkathete und Hypotenuse berechnen lässt, also

$$\sin(\gamma_s) = \frac{A_{\text{senkrecht}}}{A_H}$$

und

$$\sin(\chi) = \frac{A_{\text{senkrecht}}}{A_{\text{Gen}}}$$

erhalten wir für $A_{\text{senkrecht}}$:

$$A_{\text{senkrecht}} = \sin(\gamma_s) \cdot A_H = \sin(\chi) \cdot A_{\text{Gen}} = \sin(\beta + \gamma_s) \cdot A_{\text{Gen}}.$$

Dabei folgt das letzte Gleichheitszeichen durch $\beta + \gamma_s + (180^\circ - \chi) = 180^\circ$, also $\chi = \beta + \gamma_s$.

Durch Umformen erhalten wir

$$A_{\text{Gen}} = \frac{A_H \cdot \sin(\gamma_s)}{\sin(\beta + \gamma_s)}$$

und mit der Formel (1)

$$E_{gen} = \frac{E_H \cdot \sin(\beta + \gamma_s)}{\sin(\gamma_s)}.$$

Für eine Sonnenhöhe von 40° liegt die optimale Neigung des Photovoltaikmoduls z.B. bei ca. 50° . [22]

Für die diffuse Strahlung machen wir die vereinfachende Annahme, dass die Strahlungsflussdichte von jeder Richtung gleich stark ist, was auch isotroper Ansatz genannt wird. Dann gilt für ein senkrecht stehendes Photovoltaik-Modul, also eines mit einem Winkel $\beta = 90^\circ$, dass nur die Hälfte der diffusen Strahlung ankommt:

$$E_{diffus,Gen} = \frac{1}{2} \cdot E_{diffus,H}.$$

Auf einem horizontalen Photovoltaik-Modul kommt die gesamte Strahlungsflussdichte der diffusen Strahlung an. Bei Neigungswinkeln dazwischen lässt sich die Strahlungsflussdichte durch

$$E_{Gen} = E_{diffus,H} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(\beta))$$

berechnen.[22]

Der isotrope Ansatz ist allerdings eine Vereinfachung, die vor allem an wolkenlosen Tagen nicht mit der Realität übereinstimmt, da dann die Strahlungsflussdichte der diffusen Strahlung aus der Richtung der Sonne größer ist.[10] Auch für die reflektierte Strahlung machen wir den isotropen Ansatz. Sie hängt außerdem von der Reflektivität des Bodens, der Albedo a , ab. Diese liegt bei hellen Oberflächen sehr hoch, z.B. hat eine neue Schneedecke eine Albedo von bis zu 0,9. Bei dunkleren Oberflächen ist die Albedo geringer, bei Wäldern zum Beispiel 0,05 – 0,18. Auf einem horizontalen Photovoltaikmodul kommt keine reflektierte Strahlung an, auf einem senkrechten Modul die Hälfte der reflektierten Strahlung. Für andere Winkel erhält man die Strahlungsflussdichte der vom Boden reflektierten Strahlung durch

$$E_{Refl,Gen} = E_G \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(\beta)) \cdot a.$$

Außerdem gilt: je steiler eine Photovoltaikanlage, desto weniger ist sie für

Ort	Ausrichtung	Neigungswinkel	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Deutschland	Süd	30°	1,67	1,54	1,31	1,16	1,07	1,01	1,02	1,10	1,25	1,38	1,58	1,68
		45°	1,88	1,70	1,37	1,15	1,02	0,95	0,96	1,08	1,28	1,46	1,76	1,93
		60°	2,02	1,77	1,36	1,09	0,93	0,84	0,86	1,00	1,25	1,48	1,85	2,07
	Süd-west	30°	1,55	1,36	1,21	1,08	1,02	0,97	0,96	1,05	1,16	1,29	1,42	1,48
		45°	1,73	1,46	1,24	1,06	0,98	0,91	0,90	1,02	1,17	1,35	1,54	1,61
		60°	1,83	1,49	1,22	0,99	0,89	0,82	0,81	0,94	1,13	1,34	1,56	1,68
	West	30°	1,10	0,98	0,98	0,93	0,92	0,90	0,88	0,93	0,96	1,02	1,01	0,95
		45°	1,12	0,97	0,95	0,87	0,86	0,83	0,81	0,87	0,92	1,00	0,99	0,93
		60°	1,10	0,93	0,90	0,80	0,78	0,76	0,74	0,79	0,86	0,95	0,96	0,91
	Süd-ost	30°	1,35	1,36	1,19	1,12	1,05	1,02	1,05	1,08	1,16	1,20	1,35	1,45
		45°	1,43	1,46	1,21	1,11	1,01	0,97	1,01	1,05	1,17	1,22	1,45	1,61
		60°	1,47	1,48	1,18	1,05	0,93	0,89	0,94	0,98	1,12	1,18	1,46	1,68
	Ost	30°	0,87	0,98	0,95	0,97	0,96	0,98	1,00	0,96	0,95	0,90	0,94	0,95
		45°	0,83	0,98	0,91	0,93	0,90	0,93	0,96	0,91	0,91	0,86	0,92	0,93
		60°	0,80	0,94	0,85	0,86	0,83	0,85	0,90	0,84	0,84	0,80	0,86	0,89
Mar- seille	Süd	60°	1,80	1,43	1,20	0,97	0,82	0,76	0,79	0,91	1,11	1,35	1,65	1,89
Kairo	Süd	60°	1,39	1,21	1,00	0,82	0,68	0,62	0,65	0,75	0,93	1,15	1,34	1,44

Abbildung 8: Korrekturfaktoren für Erträge von geneigten Photovoltaik-Modulen, Quelle: [22], S.292.

Verschmutzung durch Ablagerung anfällig, wodurch Energieverluste vermieden werden. [22]

Auch die Ausrichtung der Anlage spielt eine Rolle, vor allem bei steilen Anlagen. Das Optimum der Ausrichtung und der Neigung hängt vom Sonnenstand ab. In Abb. 8 sind die Korrekturfaktoren für verschiedene Ausrichtungen und Neigungswinkel in Deutschland für die einzelnen Monate zu sehen. Um den Tagesertrag eines Moduls zu erhalten, wird der jeweilige Korrekturfaktor mit dem Tagesertrag eines horizontalen Moduls multipliziert.[22](S.293)

Das heißt, es genügt nicht, die jährliche Globalstrahlung am entsprechenden Standort zu kennen, um den Jahresertrag möglichst genau zu berechnen. Dafür braucht es zu jedem Zeitpunkt den Sonnenstand, die diffuse und die direkte Sonnenstrahlung und außerdem die Albedo des Bodens. Für eine genauere Berechnung der diffusen Strahlung ist auch noch die Bewölkung relevant. Die Monatssummen der auf eine Photovoltaikanlage auftreffende Strahlungsflussdichte können anhand von Tabellen für einen bestimmten Neigungs- und Azimutwinkel abgeschätzt werden. Es gibt allerdings auch Online-Rechner, die Jahreserträge berechnen können, siehe Kapitel 7.1.[22]

5.3 Installierte Peak-Leistung

Natürlich sind auch Größe und Beschaffenheit der Anlage für ihren Jahresertrag von Belang. Die Leistung einer Photovoltaikanlage wird meistens als Peak-Leistung $P_{PV,peak}$ in kWp , also unter sogenannten Standardbedingungen, angegeben. Diese Standardbedingungen sorgen für eine Spitzenleistung von Photovoltaikanlagen und umfassen volle Sonneneinstrahlung (Strahlungsflussdichte von 1000 W/m^2), eine Modultemperatur von 25°C (eine höhere Temperatur verringert die Leistung) und das Standardlichtspektrum (ein höherer blauer Anteil vom Sonnenlichts vergrößert die Leistung). Die Peak-Leistung hängt von der Größe und dem Wirkungsgrad der Anlage ab. Ist jetzt die Strahlungsflussdichte E_{PV} , die auf der Photovoltaikanlage ankommt, aus Abschnitt 5.2 bekannt, so kann die jährliche Bestrahlung H_{PV} (also die Strahlungsenergie pro Fläche für ein Jahr) durch

$$H_{PV} = E_{PV} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h}$$

berechnet werden. [22]

Da das Modul nicht immer eine Temperatur von 25°C hat, gibt es zusätzlich Korrekturfaktoren K_{Temp} für die Temperatur, vergleiche [22] S. 292/293.

Der Brutto-Jahresertrag $W_{Jahr, gross}$ einer Photovoltaikanlage lässt sich damit durch

$$W_{Jahr, gross} = H_{PV, Jahr} \cdot \frac{P_{PV, peak}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \cdot K_{Temp}$$

berechnen.

5.4 Wechselrichter und andere Verluste

Nicht nur die Photovoltaikanlage, auch der zur Umwandlung des Gleichstroms in Wechselstrom genutzte Wechselrichter hat einen begrenzten Wirkungsgrad und deshalb Verluste. [22]

Hinzu kommen unter anderem Leitungsverluste und die Verschmutzung der Module. Der Online-Rechner [9] gibt eine Vorauswahl von 14 % als Wert für diese Verluste, die nicht von den Solarzellen verursacht werden. Das heißt wir

erhalten den Jahresertrag W_{Jahr} durch

$$W_{Jahr} = W_{Jahr, \text{gross}} \cdot (1 - Verluste).$$

6 Welche Photovoltaik-Module sind für das Rathaus West geeignet?

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Module ausgewählt wurden und die Auswahl begründet. In Abschnitt 7 wird dann der Jahresertrag einer potentiellen Photovoltaikanlage auf dem Rathaus West für drei verschiedene Module berechnet, um genauer zwischen Denkmalschutz, Kosten und Jahresertrag abwägen zu können.

6.1 Wie kann eine Photovoltaikanlage die Anforderungen des Denkmalschutzes erfüllen?

Seit Juli 2022 gibt es in Baden-Württemberg neue Leitlinien für Photovoltaikanlagen auf Denkmälern. Das Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen hat darin unter anderem festgelegt, dass sich die Anlagen „der eingedeckten Dachfläche unterordnen“ [2] müssen. Dafür sollten die Photovoltaikmodule mit ausreichendem Abstand vom Rand des Daches installiert werden, sodass die Form des Denkmals erhalten bleibt. Des Weiteren sollten die Photovoltaikmodule gleichmäßig und ohne Lücken angebracht werden und sowohl matt als auch an die Farbe des Dachs angepasst sein. [2]

Außerdem hat ein Vertreter des Landesamts für Denkmalpflege, der im Rahmen des Seminars ans KIT eingeladen war, betont, dass farblich unpassende Rahmen unerwünscht sind. Auch weiße Rückseitenfolien, durch die das typische Rastermuster entsteht, sind laut ihm zu vermeiden [13], [19]. Ein Beispiel für eine Photovoltaikanlage mit farblich auffallenden Rahmen und Rastermuster ist in Abb. 9 zu sehen. Auf dieser Abbildung ist auch zu erkennen, was mit den oben erwähnten ungleichmäßig angebrachten Anlagen gemeint ist. Des Weiteren stellen nach dem Vertreter des Landesamts für Denkmalpflege Photovoltaikanlagen, die nicht auf vom öffentlichen Raum aus einsehbaren Dachflächen installiert sind, keinen Widerspruch zum Denkmalschutz dar.



Abbildung 9: Photovoltaikanlage mit farblich auffallenden Rahmen, Rastermuster und Lücken als Negativ-Beispiel aus Sicht des Denkmalschutzes, Quelle: [18].

6.2 Beschreibung des Rathaus West

Das Rathaus West ist ein Gebäude mit dreieckigem Grundriss und Innenhöfen, siehe Abb. 10. Da es ein Sandsteingebäude ist, ist die Wandfarbe gelblich bis bräunlich. Es besteht aus einer Süd-, einer West- und einer Nordostseite, die jeweils ein Satteldach mit einem Innen- und einem Außendach haben. In der Südost-Ecke des Gebäudes befindet sich ein markanter turmartiger Dachaufbau mit einer Eindeckung aus Kupferblech. Im Innenhof stehen zwei weitere Gebäude, eines mit rotem Ziegeldach, eines mit Flachdach. Bis auf den Turm sind alle Außendächer mit roten Ziegeln gedeckt. Die Innendächer sind teilweise graue Flachdächer.

Alle roten Ziegeldächer besitzen Dachfenster. Außerdem hat das Süd-Dach am linken und rechten Rand des Außendaches jeweils eine Dachgaube, und das Nordost-Dach hat am südlichen Ende eine Dachgaube. Das Süd-Dach ist gut von der Kaiserallee aus einsehbar und auch der südliche Teil des West-Dachs ist von dort aus zu sehen, siehe Abb. 11. Von der Grashofstraße (westlich des Gebäudes) und der südlichen Hildapromenade (nordöstlich des Gebäudes) aus ist das Dach nicht einsehbar. Das Nordost-Dach ist im Sommer hinter

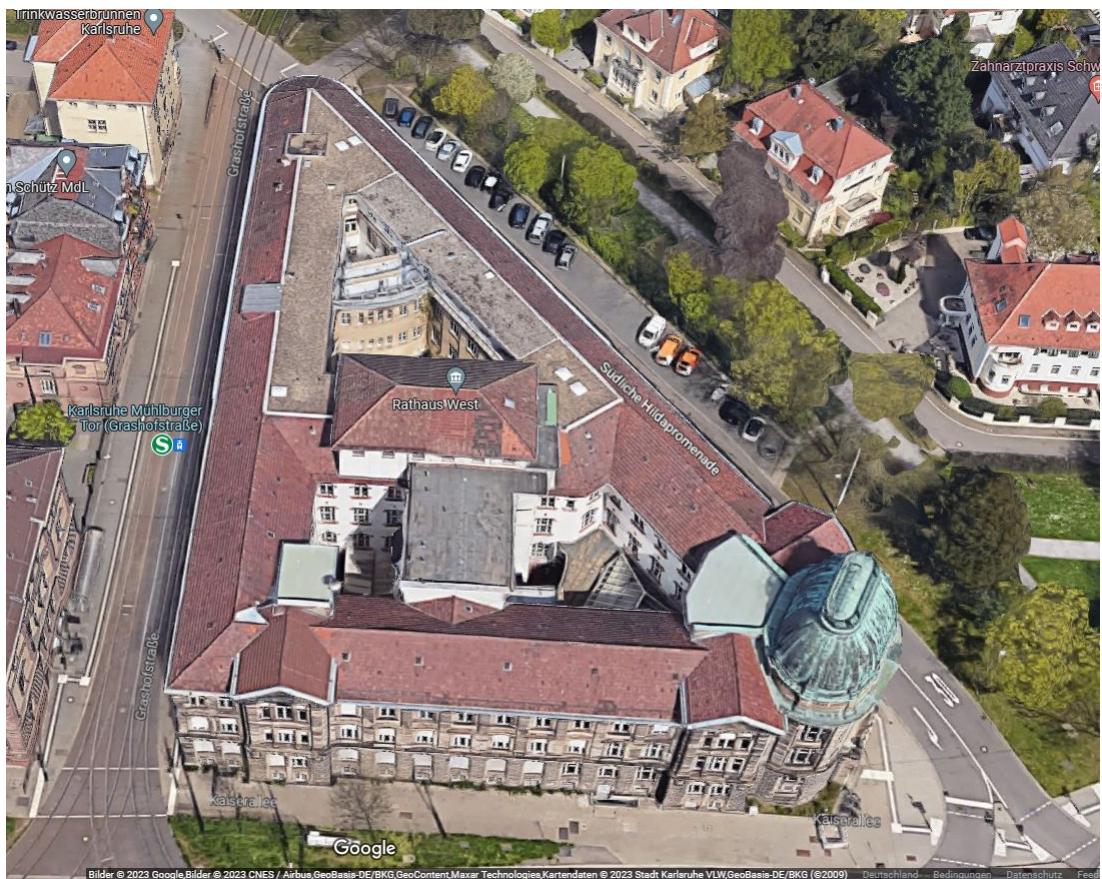


Abbildung 10: Rathaus West von oben, Quelle: [11].



Abbildung 11: Foto vom Rathaus West, aus Süden von der Kaiserallee aus.



Abbildung 12: Foto des Rathaus West von Norden aus.



Abbildung 13: Foto vom Rathaus West, aus Osten von der Kaiserallee, im Winter.



Abbildung 14: Photovoltaikziegel MATCH tile M65-HC24 terracotta A5 N|, Quelle: [20].

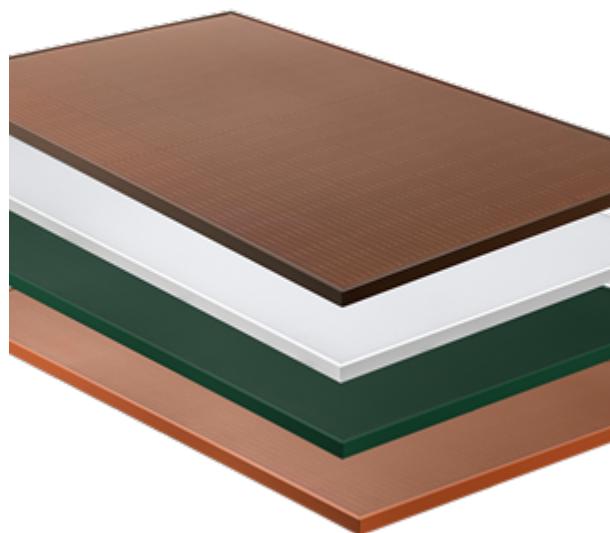


Abbildung 15: Rote und andere Photovoltaik-Aufdachmodule, zum Beispiel Bisol Spectrum 305|, Quelle: [3]

Laubbäumen versteckt, im Winter aber von der östlichen Kaiserallee zu sehen, siehe Abb. 13. Von der Stabelstraße ist nur das nördliche Eck des Daches zu sehen (siehe Abb. 12). Die Dächer der Gebäudeteile zwischen beiden Innenhöfen, sowie die Innendächer sind von keiner Seite einsehbar.

6.3 Beispiel-Module für das Rathaus West

Die folgenden Module wurden aus [24] so ausgewählt, dass sie zur Optik des Rathauses passen und die Peak-Leistungen bekannt und möglichst groß sind. Optimal für das Rathaus West wären - wenn man nur den Denkmalschutz betrachtet - wohl rote Photovoltaik-Ziegel als In-Dach-System, zum Beispiel die

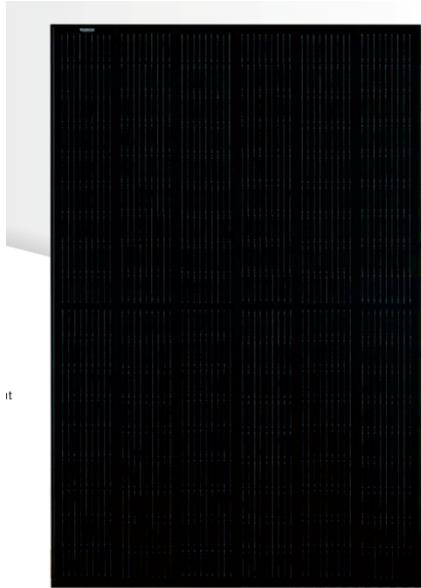


Abbildung 16: Schwarzes Aufdachmodul 395W Ulica full black|, Quelle [1].

Ziegel

`MATCH tile M65-HC24 terracotta A5 N` von Megasol, die in Abbildung 14 zu sehen sind. Allerdings sind diese nicht sonderlich effizient, die Peak-Leistung je Fläche liegt bei $155,9 \frac{W_p}{m^2}$. Außerdem haben solche Ziegel den Nachteil, dass sie teuer sind, vor Allem wenn es sich nicht um einen Neubau handelt und somit das Dach für die Anbringung erneuert werden müsste. Zusätzlich sind die Photovoltaikziegel wegen der Vielzahl an Steckverbindungen besonders störanfällig. Die genauen Preise dieser Ziegel sind nicht bekannt. [14]

Es gibt auch die Möglichkeit bei der roten Modul-Farbe zu bleiben, aber Aufdachsysteme in typischer Modulgröße zu wählen, zum Beispiel das Modul `Bisol Spectrum 305`, siehe Abbildung 15. Damit ist das mit einer Photovoltaikanlage ausgestattete Dach in ästhetischer Hinsicht etwas weiter vom ursprünglichen Erscheinungsbild des Daches entfernt, als bei den oben genannten Ziegeln. Allerdings sinken die Störanfälligkeit und der Preis deutlich. Eines dieser Module mit Abmessungen $1722 \times 1134 \times 30 mm$ kostet 445 €. Außerdem liegt die Peak-Leistung je Fläche für dieses Aufdachsystem höher: $179 \frac{W_p}{m^2}$. Doch optimal ist die Leistung der roten Module immer noch nicht. Das liegt daran, dass farbige Module immer einen schlechteren Wirkungsgrad haben als die typischen blau bis schwarzen Module. Denn um eine bestimmte Farbe zu erhalten, kann die Dicke der Antireflexionsschicht, die sich auf der Oberseite der Solarzelle

befindet, modifiziert werden. Somit werden die unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich stark reflektiert, wodurch es allerdings auch zu größeren Reflexionsverlusten kommt. Auch durch gefärbte Gläser kann die gewünschte Farbe eines Moduls erhalten werden, was ebenfalls einen Leistungsverlust zur Folge hat. [15]

Das dritte Modul-Beispiel für das Rathaus-West ist ein Full-Black Modul: `395W Ulica full black`, siehe Abbildung 16. Full-Black Module sind schwarze Module mit schwarzem Rahmen und schwarzer Rückseitenfolie, sodass eine flächig schwarze Photovoltaikanlage ohne Rastermuster entsteht.[13] Die Peak-Leistung je Fläche ist bei diesem Modul mit $211 \frac{W_p}{m^2}$ die beste der hier ausgewählten Module. Auch beim Preis schneidet dieses $1722 \times 1134 \times 30 \text{ mm}$ große Modul am besten ab, das mit 167 € weniger als die Hälfte des roten Moduls kostet.

Zu beachten ist, dass hier stets nur die Preise für die bloßen Module (ohne Installationsarbeit, ohne Wechselrichter, etc.) angegeben sind. Auch die Leistung ist nur für die Module ohne Wechselrichter angegeben.

7 Berechnung des Jahresertrags einer Photovoltaikanlage auf dem Rathaus West und der zugehörigen Preise

In den folgenden beiden Abschnitten geht es um den Jahresertrag einer Photovoltaikanlage auf dem Dach des Rathaus West, auf Basis der Module aus Abschnitt 6.3. Zuerst wird beschrieben, wie der Jahresertrag berechnet wurde, dann werden die Ergebnisse dargestellt und zusätzlich die Preise für die Module der Anlagen angegeben.

7.1 Methodik der Berechnungen

Die Berechnungen des Jahresertrags wurden für sechs verschiedene Teile des Dachs separat gemacht, die in Abb. 17 in Hell- und Dunkelblau, Rot, Gelb, Orange, Hell- und Dunkelgrün markiert sind. Die blau markierten Flächen sind die nicht-einsehbaren Dachflächen, wobei die dunkelblau markierten Flächen

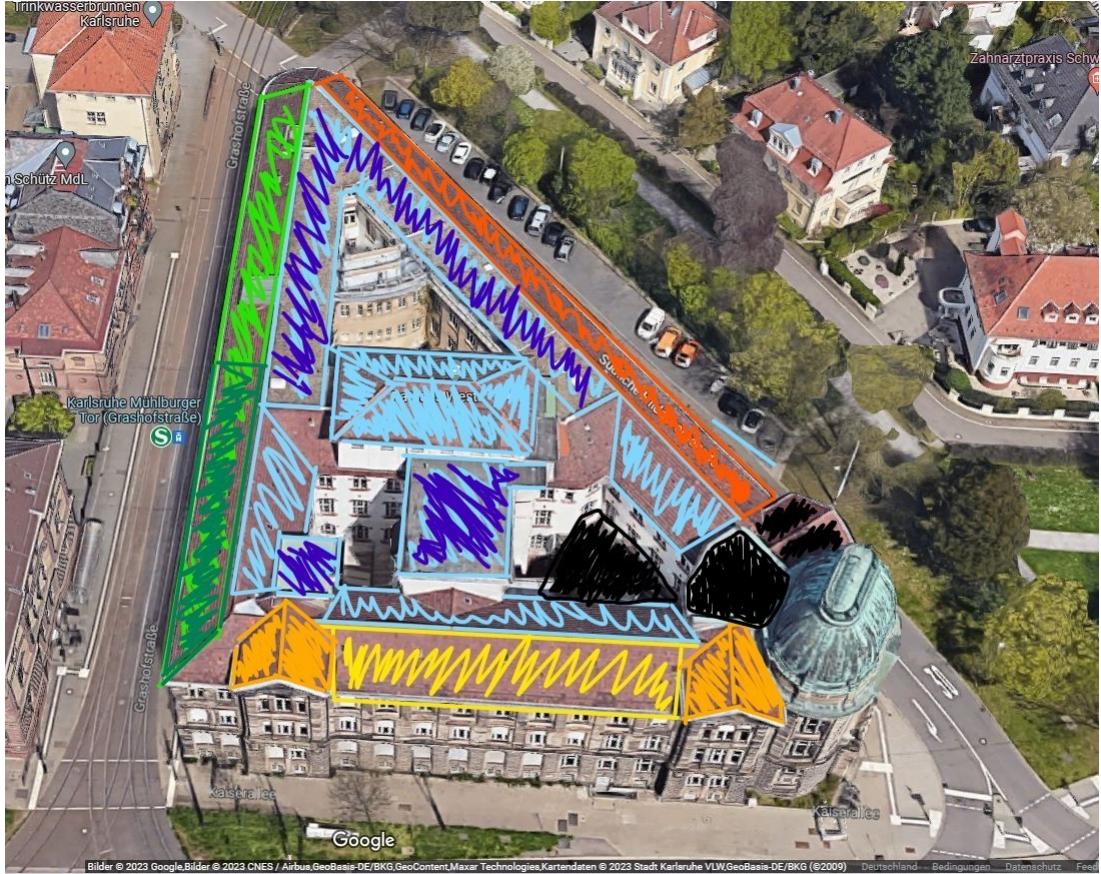


Abbildung 17: Dachflächen des Rathaus West, die getrennt betrachtet werden, Quelle: [11].

Flachdächer und die hellblau markierten rote Dächer sind. Die rot markierte Dachfläche ist nur im Winter (wenn die davorstehenden Bäume kein Laub haben) zu sehen, das gelb markierte Dach und die orange markierten Gauben ganzjährig. Vom grün markierten Dach ist nur der dunkelgrüne Teil zu sehen. Die schwarz markierten Flächen werde ich wegen Beschattung durch den Turm nicht betrachten. Da das Dach des Turms wegen seiner gewölbten Form und der Beschaffenheit der Eindeckung schlecht für Photovoltaikmodule geeignet ist, wird der Turm ebenfalls außer Acht gelassen.

Die dunkelblau markierten Flächen haben eine Neigung von ca. 0° . Die Neigung der rot, gelb, orange und grün markierten Flächen beträgt ca. 30° . Die hellblau markierten Flächen haben teilweise eine Neigung von ca. 25° (das Dach des Gebäudes im Innenhof) und teilweise eine Neigung von ca. 30° (die restlichen Dächer). Die genauen Neigungen der Dächer sind in Unterlagen der LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) zu finden.

Um abschätzen zu können, wie viel Photovoltaik auf die einzelnen Dach-

flächen passt, werden die Dachflächen mit dem Dachflächenrechner (unter [4] zu finden) mit Hilfe der oben angegebenen Neigungen und mit Hilfe von Google Maps berechnet.

Für die Aufdachmodule wird ausgemessen und abgeschätzt, wie viele ganze Module auf die jeweilige Fläche passen. Für die Photovoltaik-Ziegel werden wegen ihrer vergleichsweise kleinen Form die nicht durch Photovoltaik bedeckten Ränder, die möglicherweise (durch abweichende Form und Größe im Vergleich zu den ursprünglichen Ziegeln) entstehen, vernachlässigt. Hier wird die gesamte Dachfläche abgemessen und angenommen, dass sie komplett von Photovoltaik bedeckt ist.

Zwischen zwei Dachfenstern steht eine $5,3\text{ m} \times 6,0\text{ m}$ große Fläche zur Verfügung. Da die Maße der Aufdachmodule aus Kapitel 6.3 $1,722\text{ m} \times 1,134\text{ m}$ sind, heißt das, dass auf die Fläche zwischen zwei Dachfenstern 15 dieser Module passen. Auf dem Süd-Dach, auf der hellgrün markierten und auf der dunkelgrün markierten Dachfläche ist es also möglich, je 60 Module zu installieren. Auf dem Nordost-Dach wären 165 Module möglich und auf der hellblau markierten Fläche 120 Module. Auf den Gauben (orange markiert) finden insgesamt 24 Module Platz, auf den dunkelblau markierten Flächen 238 Module. Das heißt, auf dem gesamten Dach des Rathauses können 727 dieser Module untergebracht werden.

Für die Photovoltaikziegel stehen auf dem Süd-Dach $195,5\text{ m}^2$, auf den Gauben insgesamt 121 m^2 , auf der dunkelgrün markierten Fläche $178,8\text{ m}^2$, auf der hellgrün markierten Fläche $225,5\text{ m}^2$, auf dem Nord-Ost-Dach 444 m^2 und auf der hellblau markierten Fläche $351,5\text{ m}^2$ zur Verfügung. Die dunkelblau markierte Fläche wurde nicht berechnet, da es nicht sinnvoll wäre graue Dächer mit den teuren und weniger effizienten roten Solarziegeln zu decken. Damit stehen auf dem gesamten Dach $1515,8\text{ m}^2$ für Photovoltaikziegel zur Verfügung.

Zur Berechnung des Jahresertrags wird der in [22] empfohlene Online-Rechner von der europäischen Kommission genutzt, der auf der Seite

https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

[9] zu finden ist. In diesem Online-Rechner wird die Adresse des Gebäudes,

die installierte Peak-Leistung (in kWp) und die Neigung und der Azimut (jeweils in°) angegeben. Außerdem kann die Art der Photovoltaikzelle (zum Beispiel auf Dünnschicht-Modul) geändert werden. Da die Module in Abschnitt 6.3 alle polykristalline Solarzellen sind, wird die Einstellung "kristallines Silizium" beibehalten. Auch die Systemverluste von 14% und die Datenbank mit den Werten der solaren Strahlung (PVGIS_SARAH2) werden übernommen. Des Weiteren wird ausgewählt, dass die Photovoltaikanlage nicht freistehend ist, sondern auf einem Dach installiert wird.

7.2 Ergebnisse

		schwarze Module		rote Aufdachmodule		rote PV-Ziegel	
Teil der Dachfläche	farbliche Markierung (von Abb. 17)	Peak-Leistung [kWp]	Jahresertrag [kWh]	Peak-Leistung [kWp]	Jahresertrag [kWh]	Peak-Leistung [kWp]	Jahresertrag [kWh]
Süd-Dach	gelb	23,7	25 545,17	18,3	19 724,75	30,48	32 851,36
nicht-sichtbarer Teil des West-Dachs	hell-grün	23,7	20 702,92	18,3	15 985,8	35,16	30 709,72
sichtbarer Teil des West-Dachs	dunkel-grün	23,7	20 702,92	18,3	15 985,8	27,87	24 349,88
Nord-Ost-Dach	rot	65,18	49 405,68	50,325	38 148,69	69,22	52 471,67
geneigter Teil des Innendachs	hell-blau	38,32	30 070,75	29,59	23 22,18	88,46	74 446,88
flacher Teil des Innendachs	dunkel-blau	94,01	83 626,62	72,59	66 700,98	—	—
Dachgauben	orange	9,48	8 298,48	7,32	6 407,69	18,86	16 512,84
Gesamt	—	278,08	202 352,54	214,72	186 172,89	270,05	231 342,35

Tabelle 1: Peak-Leistung und berechneter Jahresertrag für verschiedene Dachflächen des Rathauses Wests (siehe Abb. 17) für die in Abschnitt 6.3 beschriebenen Module.

Die Ergebnisse der Berechnungen des Jahresertrags für die verschiedenen Dach-Bereiche des Rathauses West sind in Tabelle 1 dargestellt. Außerdem sind die zugehörigen Preise der Anlagen in Tabelle 2 und die Preise pro gelieferter Energie in Tabelle 3 zu sehen. Bei diesen Preisen sind nur die Module selbst eingeflossen, keine Installationsarbeiten oder weitere benötigte Teile. Au-

Teil der Dachfläche	Markierung auf Abb. 17	Anzahl der Module	Preis für schwarze Module [€]	Preis für rote Module [€]
Süd-Dach	gelb	60	10 020	26 700
nicht-sichtbarer Teil des West-Dachs	hellgrün	60	10 020	26 700
sichtbarer Teil des West-Dachs	dunkelgrün	60	10 020	26 700
Nord-Ost-Dach	rot	165	27 555	73 425
geneigter Teil des Innendachs	hellblau	97	16 199	43 165
flacher Teil des Innendachs	dunkelblau	238	39 746	105 910
Dachgauben	orange	24	4 008	10 680
Gesamt	—	704	117 568	313 280

Tabelle 2: Anzahl und Preis von roten und schwarzen Aufdachmodulen aus 6.3 für verschiedene Dachflächen des Rathauses West (siehe Abb. 17). Der Preis bezieht sich nur auf die verwendeten Module, ohne Kosten für Installation, Wechselrichter, etc.

Teil der Dachfläche	Markierung auf Abb. 17	Preis pro gelieferter Energie für schwarze Module [€/kWh]	Preis pro gelieferter Energie für rote Module [€/kWh]
Süd-Dach	gelb	0,39224636	1,35362932
nicht-sichtbarer Teil des West-Dachs	hellgrün	0,4839897	1,67023233
sichtbarer Teil des West-Dachs	dunkelgrün	0,4839897	1,67023233
Nord-Ost-Dach	rot	0,55772939	1,92470567
geneigter Teil des Innendachs	hellblau	0,53869624	1,85902345
flacher Teil des Innendachs	dunkelblau	0,47527928	1,58783274
Dachgauben	orange	0,48298002	1,6667473

Tabelle 3: Preis pro gelieferter Energie von den roten und schwarzen Aufdachmodulen aus Abschnitt 6.3 für verschiedene Dachflächen des Rathauses West (siehe Abb. 17). Der Preis bezieht sich nur auf die verwendeten Module, ohne Kosten für Installation, Wechselrichter, etc.

ßerdem sind die Preise nur für die Aufdachmodule angegeben, da die Kosten für die Ziegel nicht bekannt sind. Der Preis pro gelieferter Energie lässt einen Vergleich zu, wie am günstigsten Strom aus einer Photovoltaikanlage gewonnen werden kann.

Es ist zu erkennen, dass für jede Dachfläche die roten Ziegel den höchsten Jahresertrag haben, gefolgt von schwarzen Aufdachmodulen. Die roten Aufdachmodule haben den geringsten Jahresertrag. Das liegt daran, dass rote Aufdachmodule eine geringere Peak-Leistung pro Fläche haben als schwarze Module. Die Ziegel schneiden so gut ab, da (wie in Abschnitt 7.1 beschrieben) durch ihre kleine Form kaum unbedeckte Ränder auf dem Dach bleiben und diese Ränder bei den Berechnungen vernachlässigt wurden. Somit ist bei den Ziegeln eine größere Fläche mit Photovoltaik bedeckt als bei den Aufdachmodulen.

Die dunkelblau markierten Flächen (flache Innendächer) haben den höchsten Jahresertrag, gefolgt von dem Nordost-Dach und den geneigten Innendächern. Die Gauben haben den kleinsten Jahresertrag. Das gleiche gilt für den Preis. Beim Preis pro gelieferter Energie schneidet das Süd-Dach am besten ab, gefolgt vom West-Dach, dem flachen Innendach und den Gauben, die alle auf einem ähnlichen Niveau liegen. Die (teilweise) nach Norden ausgerichteten geneigten Innendächer und das Nordost-Dach schneiden hier am schlechtesten ab. Für die günstigeren schwarzen Module liegt der Preis pro gelieferter Energie natürlich auch weiter unten als für die roten Module. Diese Größe hängt also alleine von der Ausrichtung und dem gewählten Modul ab.

8 Fazit und Diskussion

In dieser Arbeit soll die Frage beantwortet werden, ob das Rathaus West eine Photovoltaikanlage bekommen sollte und, auf welchem Teil des Daches welche Module installiert werden sollten.

8.1 Fazit

Photovoltaik-Ziegel lohnen sich finanziell, unabhängig vom Gebäude, nur dann, wenn das Dach sowieso erneuert werden muss. [14]. Auch ökologisch gesehen ist die Erneuerung eines Dachs der beste Zeitpunkt für diese Ziegel, da so Res-

sourcen geschont werden können. Falls tatsächlich ein neues Dach gebraucht wird, sind Photovoltaik-Ziegel also eine der besten Optionen, da sie die Optik des denkmalgeschützten Rathauses sehr gut erhalten, und auch einen großen Jahresertrag erreichen können (vgl. Tabelle 1). Die Photovoltaik-Ziegel könnten dann auf allen Ziegel-Flächen des Dachs installiert werden.

Die flachen Flächen des Innendachs (dunkelblaue Markierung) haben das höchste Potential zur Stromgewinnung. Diese Dächer sind grau, also ohne rote Ziegel und außerdem von außen nicht einsehbar. Hier ergeben deshalb schwarze Module Sinn. Diese haben den höheren Jahresertrag und sind gleichzeitig günstiger als die roten Aufdachmodule. Die Photovoltaik-Ziegel sind wegen der Optik des Daches hier nicht geeignet. Wegen dem hohen potentiellen Jahresertrag, einem im unteren Mittelfeld liegenden Preis pro gelieferter Energie und weil die Flächen vom öffentlichen Raum aus nicht einsehbar sind, ist dieses Dach insgesamt sehr gut für Photovoltaik geeignet.

Auch die steilen Flächen des Innendachs (hellblaue Markierung) sind von der Straße nicht einsehbar, sodass auch auf diesen Dächern die schwarzen, günstigeren Module ausreichend sind. Außerdem ist auch bei diesen Dachflächen nach Abschnitt 7.2 ein hoher Jahresertrag zu erwarten, sodass auch diese Dächer gut für Photovoltaik geeignet sind. Da der Preis pro gelieferter Energie hier wegen der teilweisen Ausrichtung nach Norden vergleichsweise hoch ist, ist es finanziell gesehen nicht das optimale Dach. Hier könnten auch rote Module denkbar sein, da die Dächer eventuell aus in den Innenhof gerichteten Fenstern sichtbar sind. Diese würden den Preis pro gelieferter Energie allerdings nochmals deutlich erhöhen. Nach Abschnitt 6.1 sind aber schwarze Module ausreichend.

Mit diesen beiden Flächen würde der Jahresertrag über 110000 kWh betragen (bzw. über 100000 kWh für rote Module auf den steilen Dächern).

Die dunkelgrün und rot markierten Flächen sind teilweise aus dem öffentlichen Raum einsehbar, was bedeutet, dass rote Module hier besser geeignet sind, aber auch schwarze Module keine großen Auswirkungen auf die Optik des Gebäudes haben. Allerdings ist aufgrund der Dachfenster bei diesen Dächern keine durchgängige Photovoltaik-Fläche möglich. Da Photovoltaikanlagen auf Denkmälern nach Abschnitt 6.1 möglichst flächig sein sollten, kann dies gegen jegliche Anlage, die aus Aufdachmodulen besteht, sprechen. Für Photovoltaik

auf diesen Flächen spricht ein mittlerer Jahresertrag, und dass die Dächer oft nicht einsehbar sind. Für das dunkelgrüne Dach kommt ein mittlerer Preis pro Energie hinzu.

Für die hellgrün markierte Fläche sind die schwarzen Module passend, da die Dachflächen nicht vom öffentlichen Raum einsehbar sind. Wenn die dunkelgrün markierte Fläche aber rote Module bekommt, könnte es sinnvoll sein, auch für die hellgrün markierte Fläche die roten Module zu wählen, da die Grenze der beiden Flächen wahrscheinlich aus Fenstern sichtbar ist. Außerdem könnten verschiedene Module auf einem Dach die Installation komplizierter machen. Da diese Fläche nicht aus dem öffentlichen Raum einsehbar ist und eine Anlage darauf beim Preis pro Energie im Mittelfeld liegen würde, ist auch diese Fläche gut für Photovoltaik geeignet.

Das Süd-Dach und die Gauben (gelb und orange markiert) sind sehr gut einsehbar, vor allem von der gut besuchten bzw. befahrenen Kaiserallee. Da der mögliche Jahresertrag im Vergleich zu den anderen Flächen eher klein ist (für rote Module ca. 26000 kWh) und wegen Dachfenstern keine durchgängige Photovoltaikanlage mit Aufdachmodulen möglich ist, ist die Südseite insgesamt schlecht für Photovoltaikanlagen geeignet, auch wenn hier der Preis pro Energie am besten abschneidet.

Aufgrund der hier durchgeföhrten Analyse ergeben sich damit die folgenden vier Möglichkeiten, die einen Kompromiss zwischen Denkmalschutz, Kosten und Klimaschutz beziehungsweise Energiewende bilden:

1. Schwarze Module für die flachen Innendächer (dunkelblau markierte Fläche), rote Ziegel für die anderen Dächer.

Diese Option würde einen Jahresertrag von $314\,968,97 \text{ kWh}$ liefern und der Preis der verwendeten Photovoltaikmodule ist nicht bekannt. Aus oben beschriebenen Gründen ist diese Option nur dann zu wählen, wenn das Dach erneuert werden muss. Ansonsten ist eine der nächsten drei Optionen zu bevorzugen.

2. Süd-Dach und Gauben (gelbe und orangefarbene Markierung) bekommen keine Photovoltaik, alle anderen Flächen bekommen schwarze Photovoltaik-Module.

Somit kann ein Jahresertrag von 204 508,89 kWh erreicht werden, wobei die Photovoltaik-Module 103 540 € kosten würden.

3. Die von der Straße aus nicht-sichtbaren Flächen (hellblaue und dunkelblaue Markierung) werden mit schwarzen Modulen bestückt, Süd-Dach und Gauben (gelbe und orange Markierung) bleiben ohne Photovoltaik, die anderen sichtbaren Flächen (grüne und rote Markierung) werden mit roten Modulen bestückt.

Die Module für diese Option würden 182 770 € kosten und einen Jahresertrag von 183 817,66 kWh liefern.

4. Auf den flachen Innendächern (dunkelblaue Markierung) werden schwarze Module installiert, Süd-Dach und Gauben (gelbe und orangefarbene Markierung) bleiben ohne Photovoltaik, auf allen anderen Dächern werden rote Module installiert.

Hierbei würde der Preis der Module 209 736 € betragen und es kann ein Jahresertrag von 176 966,09 kWh erreicht werden.

Letztendlich kann allerdings nur das Denkmalschutzamt entscheiden, ob diese Möglichkeiten den Denkmalschutz-Vorgaben genügen.

8.2 Grenzen dieser Arbeit

In dieser Arbeit wurden keine Verfügbarkeiten von Materialien und Handwerkern thematisiert und die Nachhaltigkeit der Produktion der Photovoltaik-Module nicht beachtet. Außerdem wurden die Statik des Gebäudes und Beschattung (am Morgen oder Abend) durch Nachbargebäude außer Acht gelassen. Die Dachflächen-Messung war keine genaue Messung, sondern eine Messung mit einem Online-Programm und ohne mögliche Hindernisse auf dem Dach zu kennen. Möglicherweise wurden so auf dem Dach befindliche Dinge übersehen,

die kleiner als Dachfenster sind und damit nicht bei Google Maps erkennbar. Das Schreiben dieser Arbeit geschah ohne Wissen über geplante Sanierung des Gebäudes in den nächsten Jahren, die eine jetzige Installation von Photovoltaik ausschließen würden. Außerdem sind in dieser Arbeit keine Angaben zu den vollständigen Preisen inklusive Installation, nur Angaben zu den Modul-Preisen gemacht worden.

8.3 Ausblick

In zukünftigen Arbeiten könnte die Frage nach der Statik, nach Sanierungen und nach weiteren Hindernissen geklärt werden (zum Beispiel durch Nachfragen bei der Stadtverwaltung). Die Nachhaltigkeit der Produktion der Photovoltaikanlagen könnte recherchiert und berücksichtigt werden und die Verschattung durch Nachbargebäude beobachtet werden. Des Weiteren könnten Installateure und Herstellerfirmen bezüglich Verfügbarkeit und Preisen der Installation gefragt werden. Um die Kosten genauer miteinzubeziehen, könnte auch die Amortisierungszeit der Anlagen bestimmt werden. Außerdem könnte eine grafische Simulation erstellt werden, wie die vier in Abschnitt 8.1 angegebenen Möglichkeiten auf dem Dach des Rathauses aussehen würden. Mit Hilfe von diesen Bildern könnten auch Anwohner und Passanten befragt werden.

Literatur

- [1] ACTEC: 395W ULICA FULL BLACK SOLARMODUL|. https://www.actec-solar.de/solar/395w-solarmodul-monokristalin-halbzellen-solarpanel-mc4-solar-full-black-garantie-25-jahre-leistungsgarantie-schwarz-schwarz_20603_1681, . – Letzter Zugriff: 16.03.2023
- [2] BADEN-WÜRTTEMBERG MINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND WIRTSCHAFT: *Leitlinien für PV-Anlagen auf Denkmalen.* <https://mlw.baden-wuerttemberg.de/de/denkmalsschutz/pv-und-denkmalsschutz/>, 2023. – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [3] BISOL: *BISOL Spectrum.* <https://www.bisol.com/premium?lang=de>, . – Letzter Zugriff: 16.03.2023
- [4] DEINFACHMANN: *Dachflächen Rechner - Dachfläche ermitteln.* <https://www.rechnerphotovoltaik.de/rechner/dachflaeche>, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [5] DEUTSCHE STIFTUNG DENKMALSCHUTZ: *Deutsche Stiftung Denkmalschutz - Über uns.* <https://www.denkmalschutz.de/ueber-uns.html>, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [6] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Deutscher Wetterdienst- Global-, Diffus- und Direktstrahlung (Monats- und Jahressummen sowie Abweichungen).* https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_sum.html;jsessionid=D6A536C40B0B6532F8175F80C9D8234A.live21061?nn=16102, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [7] DEUTSCHES NATIONALKOMITEE FÜR DENKMALSCHUTZ: *Denkmalschutz national.* <https://www.dnk.de/denkmalsschutz/>, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [8] DOKTOR WHATSON: *Die Wahrheit über erneuerbare Energien.* <https://www.youtube.com/watch?v=Mvm1KAAhVSA>, 2022

- [9] EUROPEAN COMMISSION: *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [10] GASSEL, A. : *Strahlungsberechnung*. http://www.ib-aton.de/service/fachaufs/diss_gss/Kap-2-2.pdf, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [11] GOOGLE MAPS: *Rathaus West, Kaiserallee 4, 76133 Karlsruhe*. <https://www.google.de/maps/place/Kaiserallee+4,+76133+Karlsruhe/@49.0110077,8.3844567,188m/>,
- [12] GRAFE, R. : *Umwelt- und Klimagerechtigkeit – Gesundheit und Wohlbefinden: Energiegewinnung und Energienutzung*. Wiesbaden and Heidelberg : Springer Vieweg, 2021 (essentials). – ISBN 978-3-658-35228-8
- [13] GRUENES HAUS: *Schwarze Solarmodule: Vor- und Nachteile von Full-Black-Modulen*. <https://gruenes.haus/schwarze-solarmodule-full-black/>, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [14] GRUENES HAUS: *Solardachziegel: Kosten, Hersteller, Vor- & Nachteile*. <https://gruenes.haus/solarziegel/>, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [15] HORN, S. : *Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV): Entwicklung und Bewertung von Fassadensystemen*, Technische Universität Dresden, Diss., 2017
- [16] KARLSRUHE STADT UND RATHAUS: *Standortwechsel auf Zeit*. <https://www.karlsruhe.de/stadt-rathaus/aktuelles/meldungen/standortwechsel-auf-zeit>, 2023. – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [17] KLOSE, B. ; KLOSE, H. : *Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. 2. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-662-43577-9
- [18] KOSTAL: *Photovoltaik mit Speicher*. <https://www.kostal-solar-electric.com/de-de/eigenheim/photovoltaik-speicher/>, . – Letzter Zugriff: 20.03.2023

- [19] LAYER, K. : *Mehr Photovoltaik=weniger Denkmalschutz? - Interview mit D. Schulz vom Landratsamt für Denkmalpflege.* Karlsruhe, 16.11.2022
- [20] MEGASOL: MATCH tile M65-HC24 terracotta A5 N|. https://store.megasol.ch/de_CH/product/match-tile-m65-hc24-terracotta-a5-n-3337-0957, . – Letzter Zugriff: 16.03.2023
- [21] MEINKA: Rathaus West & Alte Hauptfeuerwache werden Unterkünfte für Flüchtlinge. <https://meinka.de/rathaus-west-alte-hauptfeuerwache-werden-unterkuenfte-fuer-fluechtlinge/>, . – Letzter Zugriff: 19.03.2023
- [22] MERTENS, K. : *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis.* 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. München : Hanser, 2022 (Hanser eLibrary). <http://dx.doi.org/10.3139/9783446474291>. <http://dx.doi.org/10.3139/9783446474291>. – ISBN 978-3-446-47429-1
- [23] QUASCHNING, V. ; QUASCHNING, C. : *Energierevolution jetzt! Mobilität, Wohnen, grüner Strom und Wasserstoff: Was führt uns aus der Klimakrise - und was nicht?* Hanser <https://www.perlentaucher.de/buch/cornelia-quaschning-volker-quaschning/energierevolution-jetzt.html>. – ISBN 978-3-446-27301-6
- [24] ROSSBACH, A. ; LAYER, K. ; DÖRFLINGER, R. : *Informationen und Produktbeispiele für Solarmodule auf denkmalgeschützten Gebäuden.* <https://www.quartierzukunft.de/wp-content/uploads/2023/05/Informationen-und-Produktbeispiele-fuer-Solarmodule-auf-denkmalgeschuetzten-Gebaeuden.pdf>, 2023
- [25] SCHENK, M. : *Klima und VERTEILUNGSPOLITIK.* <http://www.beigewum.at/wordpress/wp-content/uploads/Klima-und-Verteilungspolitik.pdf>, . – Letzter Zugriff: 14.03.2023
- [26] SCHWEIGER, G. (Hrsg.) ; SEDMAK, C. (Hrsg.): *Handbuch Philosophie und Armut.* Berlin and Heidelberg : J.B. Metzler, 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-476-05740-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-476-05740-2>. – ISBN 978-3-476-05740-2

- [27] SEEBACHER, A. ; ALBIEZ, M. ; PARODI, O. ; QUINT, A. ; ZIMMER-MERKLE, S. ; WALTER, I. : *Wie Nachhaltigkeit möglich ist - (Ein Leporello)*. 3. Auflage. 2019. – 36.02.01; LK 01
- [28] SWR2 WISSEN: *WIR RETTEN DAS KLIMA NUR GEMEINSAM*. SWR, Dezember 2022
- [29] UNITED NATIONS: *THE 17 GOALS*. <https://sdgs.un.org/goals>, 2015

KIT Scientific Working Papers
ISSN 2194-1629

www.kit.edu