

MorphoColor®-PV-Fassade an der Energiezentrale im Pfaff-Quartier Kaiserslautern

Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts
zum Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff
„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern“



MorphoColor®-PV-Fassade an der Energiezentrale im Pfaff-Quartier Kaiserslautern

Themenbericht erstellt im Rahmen des Schlussberichts zum
Verbundvorhaben EnStadt:Pfaff:
„Implementierung des Reallabors Pfaff-Areal Kaiserslautern -
Integrierte Konzepte, innovative Technologien und sozialwissenschaftliche
Forschung im Leuchtturm für klimaneutrale Quartiere“
Teilvorhaben EnStadt:Pfaff: „Fraunhofer EnergieIKT“

Förderndes Ministerium:	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Projektträger:	Forschungszentrum Jülich GmbH
Förderkennzeichen:	03SBE112D
Projektlaufzeit:	01.10.2017 – 31.12.2024
Autoren:	Frank Ensslen Gerhard Stryi-Hipp
Ausführende Stelle:	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Heidenhofstr. 2, 79100 Freiburg
Veröffentlicht:	Juli 2025

Die Verantwortung der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Verbundprojekt EnStadt:Pfaff wurde von 8 Partnern durchgeführt und als Leuchtturmprojekt gemeinsam gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Titelbild: Rendering der Energiezentrale des Pfaff-Quartiers, Quelle: RBS wave

Weitere Informationen zu EnStadt:Pfaff: <https://pfaffquartier-klimaneutral.de/>

Zusammenfassung

Photovoltaik (PV)-Fassaden stellen in urbanen Gebieten eine wichtige Ergänzung von PV-Dachanlagen dar, da sie das Solarpotenzial bei mehrstöckiger Bebauung deutlich erhöhen können. Die Solareinstrahlung pro m² Modulfläche ist zwar in der Fassade aufgrund des Einstrahlungswinkels geringer als bei flacher Installation der PV-Module auf dem Dach, doch wird aufgrund der kontinuierlich steigenden Effizienz der PV-Module auch in der Fassade bei guter Beplanung ein hoher Solarstromertrag erreicht.

In der Fassade installiert werden PV-Module zum gut sichtbaren Gestaltungselement und können das Erscheinungsbild von Gebäuden prägen. Dies erfordert einerseits eine sorgfältige Planung und den Einsatz ausgereifter Produkte, eröffnet andererseits aber auch neue Gestaltungsmöglichkeiten, die das Gebäude aufwerten können. Um in der Breite eingesetzt zu werden, müssen sich die PV-Fassaden im Design der Gestaltung der Gesamtfassade von Gebäuden anpassen. PV-Fassaden müssen deshalb gebäudeindividuell angeboten werden in Bezug auf die Farbigkeit und das Format der PV-Module sowie die Art der Befestigungsstrukturen, dabei sollten sie einen möglichst hohen Wirkungsgrad aufweisen.

Am Fraunhofer ISE wurde die MorphoColor®-Beschichtungstechnologie entwickelt, die es ermöglicht, PV-Module in einer große Farbauswahl herzustellen mit einer hohen Farbsättigung und Farbhomogenität sowie einer sehr guten Winkelstabilität unter verschiedenen Betrachtungsrichtungen. Dabei ist die bei farbigen PV-Modulen unvermeidbare Reduktion des elektrischen Wirkungsgrades auf ein Minimum reduziert. Die innovativen MorphoColor®-PV-Module befinden sich derzeit in der Markteinführung.

An der Energiezentrale im Pfaff-Quartier in Kaiserslautern wurde im Rahmen des Vorhabens EnStadt: Pfaff eine burgunderrote MorphoColor®-PV-Fassade als eine der ersten Anlagen mit dieser Technologie in Deutschland installiert. Sie demonstriert im Eingangsbereich des Quartiers die attraktiven Gestaltungsmöglichkeiten mit innovativen farbigen PV-Fassaden. So wird erwartet, dass die Demonstrationsanlage das Interesse an PV-Fassaden und die Akzeptanz der Öffentlichkeit erhöht.

Die Planung und Umsetzung von PV-Fassadenanlagen stellt jedoch einige Herausforderungen für alle beteiligten Akteure bereit und erfordert entsprechende Kenntnisse. Deshalb werden in diesem Bericht nach der Beschreibung der demonstrierten PV-Fassadenanlage die wichtigsten Schritte des Planungsprozesses erläutert und dann die konkreten Erfahrungen bei der Planung, Ausschreibung und der Erlangung des bauordnungsrechtlichen Verwendbarkeitsnachweises für die MorpoColor®-Module der PV-Fassade an der Energiezentrale im Pfaff-Quartier beschrieben.

Damit PV-Fassaden einen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz leisten, muss ihr Stromertrag ausreichend groß sein. Deshalb wurde eine detaillierte Ertrags- und Verschattungsanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse vorgestellt und analysiert werden. Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengefasst, die im Rahmen von EnStadt: Pfaff bei der Planung und Umsetzung der PV-Fassade an der Energiezentrale gesammelt wurden. Die zentrale Erkenntnis ist, dass mit der innovativen MorphoColor®-PV-Fassadentechnologie ein ästhetisch und vom Solarstromertrag attraktives Produkt verfügbar, für eine erfolgreiche Marktverbreitung von PV-Fassaden jedoch auch die Weiterbildung der beteiligten planenden und umsetzenden Akteure erforderlich ist. Die Erfahrungen mit der Demonstrationsanlagen im Pfaff-Quartier leisten dazu einen wichtigen Beitrag.

Inhalt

Zusammenfassung	3
Abkürzungen.....	5
Abbildungen.....	6
Tabellen	7
1 Motivation für den Einsatz innovativer PV-Fassaden im Pfaff-Quartier.....	8
2 Beschreibung der demonstrierten PV-Fassade.....	10
2.1 Bedeutung innovativer Lösungen bei PV-Fassaden	10
2.2 Die Energiezentrale im Pfaff-Quartier	11
2.3 PV-Fassadenanlage mit MorphoColor®-Modulen an der Energiezentrale	13
3 Allgemeiner Planungsprozess einer BIPV-Anlage.....	14
3.1 Vorgehensweise bei der Planung einer BIPV-Anlage.....	14
3.2 Weitere Informationsquellen zur Planung von PV-Fassaden	16
4 Erfahrungen aus der Planung und Umsetzung der PV-Fassade im Pfaff-Quartier	18
4.1 Planungsprozess.....	18
4.2 Ausschreibung der Fassaden der Energiezentrale.....	22
4.3 Vorhabenbezogene Bauartgenehmigung und Zulassung im Einzelfall	24
5 Ertrags- und Verschattungsanalyse der PV-Fassade	26
5.1 Ziele der Einstrahlungs-, Ertrags- und Verschattungsanalysen.....	26
5.2 Methodik.....	27
5.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	30
6 Erkenntnisse aus der Planung und Umsetzung der PV-Fassade	34
7 Literaturverzeichnis	37

Abkürzungen

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)
BIPV	Gebäudeintegrierte PV (Building Integrated PV)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EVA	Ethylen-Vinylacetat (wird als Folie in PV-Modulen eingesetzt)
HPL	Hochdrucklaminat
kWh/a	Kilowattstunden pro Jahr
kWh/(m ² a)	Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr
kW _p	Kilowatt Peak (Angabe der Nennleistung von PV-Modulen unter Standardtestbedingungen)
LP	Leistungsphase
MVZ	Medizinisches Verwaltungsgebäude
PV	Photovoltaik
TMY	Typical Meteorological Year
TVG	Teilvorgespanntes Glas
vBG	vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

Abbildungen

Abbildung 1: Blauer Morphofalter, dessen Blau durch Interferenz auf der Lamellenstruktur der Flügel entsteht, die MorphoColor®-Beschichtung wurde dieser Technologie nachempfunden, Quelle: Gaby auf Pixabay.....	8
Abbildung 2: Rendering der Energiezentrale im Pfaff-Quartier, Darstellung der Südost- und Südwest-Fassade, die in der oberen Hälfte als PV-Fassade ausgeführt wird, Quelle: RBS wave	10
Abbildung 3: Reallabor-Bereich des Pfaff-Quartiers in Kaiserslautern mit der Energiezentrale (roter Kubus rechts unten, neben der Pforte liegend), Quelle: Triolog / EnStadt:Pfaff	11
Abbildung 4: Ansicht der Energiezentrale des Pfaff-Quartiers mit ihren verschiedenen Komponenten und Funktionen Quelle: Triolog / EnStadt:Pfaff	13
Abbildung 5: Schnitt durch die Energiezentrale, Quelle: RBS wave	19
Abbildung 6: Ansicht der Südost-Fassade der Energiezentrale, Quelle: RBS wave	20
Abbildung 7: Ausführungsplanung der PV-Fassade auf der Südost-Seite der Energiezentrale, Quelle: Megasol	20
Abbildung 8: FAST 2 Montagesystem für verdeckte Montage der PV-Module, links: horizontale Tragschienen, rechts: PV-Modul mit aufgeklebtem Backrail und Haken, der in die Tragschiene eingehängt wird, Quelle: Megasol [14].....	21
Abbildung 9: Links: Schnitt durch das PV-Modul mit Backrail und Halterungen (links), Quelle: Megasol [19] Rechts: Aufsicht auf ein PV-Modul mit den beiden Backrails auf der Rückseite (blau gestrichelt) sowie den Haltepunkten (oben, Mitte, unten), Quelle: Megasol [20]	25
Abbildung 10: Solareinstrahlung und Solarstromertrag in Abhängigkeit von der Ausrichtung der PV-Module im Verhältnis zur optimalen Ausrichtung nach Süden mit 30 Grad Neigung für Süddeutschland, Quelle: [21]	26
Abbildung 11: CAD-Modell der Energiezentrale im Pfaff-Quartier und der Nachbarbebauung, Quelle: Fraunhofer ISE	27
Abbildung 12: Vereinfachtes 3D-Modell der Südwest- (links) und Südostfassade (rechts) der Energiezentrale mit grünen Sensorpunkten im 10 cm x 10 cm Raster zur Strahlungsverfolgungsberechnung mit RADIANCE, Quelle: Fraunhofer ISE.....	28
Abbildung 13: Heat Maps der Südwest (links) und der Südwest-Fassade für Szenario 1, die Farben repräsentieren die Verteilung der jährlichen solaren Einstrahlungsmenge in kWh/(m²a), Quelle: Fraunhofer ISE	30

Tabellen

Tabelle 1: Fläche und Leistung der PV-Fassaden an der Energiezentrale	14
Tabelle 2: Kenndaten der PV-Module mit MorphoColor®-Beschichtung, die an der Energiezentrale eingesetzt werden	14
Tabelle 3: Übersicht Berechnungsszenarien und der zugehörigen Parameterannahmen.....	29
Tabelle 4: Ergebnisse der Leistungs- und Ertragsberechnungen nach Szenario und Fassadenausrichtung	31
Tabelle 5: Einfluss der Verschattung und der Modulart auf den Solarstromertrag	32
Tabelle 6: Einfluss der Ausrichtung der PV-Module auf die solare Jahreseinstahlung (unverschattet) .	33

1 Motivation für den Einsatz innovativer PV-Fassaden im Pfaff-Quartier

Was hat der blau leuchtende Morphofalter (siehe Abbildung 1) mit einem klimaneutralen Quartier zu tun? Die Antwort ist: Die Lamellenstruktur, die zur wunderbar leuchtenden Farbe auf seinen Flügeln führt, diente als Vorlage für die Entwicklung einer neuartigen Beschichtungstechnik am Fraunhofer ISE. Diese sorgt auf Photovoltaik-Modulen dafür, dass diese verschiedensten Farben annehmen können und dabei trotzdem eine hohe elektrische Effizienz aufweisen. Eine solche MorphoColor®-PV-Fassade wurde im Rahmen von EnStadt:Pfaff an der Energiezentrale des Pfaff-Quartiers installiert.



Abbildung 1: Blauer Morphofalter, dessen Blau durch Interferenz auf der Lamellenstruktur der Flügel entsteht, die MorphoColor®-Beschichtung wurde dieser Technologie nachempfunden, Quelle: Gaby auf Pixabay

Klimaneutrale Quartiere verfolgen das Ziel, einen möglichst hohen Anteil ihres Energiebedarfs mit lokalen Energiequellen zu decken. Die Solarenergie ist üblicherweise die erneuerbare Energiequelle mit dem größten Potenzial in urbanen Quartieren, weshalb ihre Potenziale so weit wie möglich genutzt werden sollten. Die Hüllflächen der Gebäude, also deren Dächer und Fassaden, dienen somit zunehmend auch zur Energieerzeugung mit dem großen Vorteil, dass die ursprünglichen Funktionen der Flächen nicht beeinträchtigt werden. Wenn künftig der Großteil der Dächer und Fassaden mit uniformen blauen oder schwarzen Standard-Photovoltaikmodulen bedeckt wäre, wäre allerdings die gestalterische Funktion der Fassaden nicht mehr gegeben. Es ist deshalb notwendig, für die Dächer und insbesondere die Gebäudefassaden ästhetisch ansprechende Solarlösungen zu entwickeln, deren Oberflächen farblich und strukturell eine große Vielfalt aufweisen und eine individuelle, dem Gebäude entsprechende Gestaltung ermöglichen. Weiter sind Gestaltungs- und Montagelösungen zur ansprechenden Integration der PV-Module in die Hüllflächen erforderlich. Das Ziel sind individuelle, den Gebäuden angepasste Photovoltaiklösungen, die die architektonische Qualität eines Quartiers nicht mindern, sondern erhöhen.

Farbige Photovoltaik (PV)-Module sind ein wichtiger Lösungsansatz für die beschriebenen Herausforderungen. Als farbig werden PV-Module bezeichnet, die andere Farben als das blau oder schwarz der üblichen PV-Module mit kristallinen Silizium-Solarzellen aufweisen. Farbige PV-Module werden schon seit den 1990er Jahren entwickelt und in Pilotprojekten umgesetzt, sie stellen aber bislang nur eine sehr kleine Marktnische dar. Eine Möglichkeit, unterschiedliche Farben der Module zu erreichen, ist eine gezielte Veränderung der Antireflexbeschichtung der kristallinen Solarzellen. Dann weisen allerdings nur die Solarzellen selbst eine Farbe auf und die resultierende erhöhte Reflektion des Sonnenlichts führt zu einer merklichen Minderung des Solarstromertrags. Ein anderer Lösungsansatz ist die farbige Beschichtung der Glasscheibe, die die Solarzellen abdeckt. Dadurch lässt sich eine homogene Farbigkeit der PV-

Module erreichen. Eine Technik ist der Digitaldruck mit Keramikfarbe auf der Rückseite des Frontglases des PV-Moduls, der eine große Gestaltungsvielfalt ermöglicht. Je nach Farbe und Farbintensität reduziert sich dabei aber der elektrische Wirkungsgrad der PV-Module und damit der Solarstromertrag um bis zu 30 % [1]. Alternativ dazu können auch organische Solarzellen eingesetzt werden, deren Materialien eingefärbt werden können. Diese weisen allerdings im Vergleich zu kristallinen Solarzellen einen niedrigeren Wirkungsgrad und eine geringere Stabilität und Lebensdauer auf.

Den großen Nachteil von farbigen PV-Modulen, die deutliche Effizienzeinbuße, konnte das Fraunhofer ISE nun durch die Entwicklung einer innovativen Farbbeschichtung weitgehend beseitigen. Die MorphoColor®-Beschichtung wurde gemeinsam mit Industriepartnern zur Marktreife entwickelt und patentiert. Die Module werden seit dem Jahr 2024 von der Firma Megasol Energie AG in der Schweiz am Markt angeboten. MorphoColor®-PV-Module weisen eine deutlich höhere Effizienz als sonstige farbige PV-Module auf, da ihr Solarstromertrag im Vergleich zu schwarzen Referenzmodulen nur um etwa 5 % reduziert ist [2]. Dies wird erreicht durch die innovative MorphoColor®-Schicht, die aus einer photonischen 3D-Struktur aus dielektrischen Materialien besteht, deren Design vom Morpho-Schmetterling inspiriert wurde (siehe Abbildung 1). Da nur die Spektralfarben reflektiert werden, die für den Farbeindruck erforderlich sind, wird das gesamte Restspektrum des Sonnenlichts auf die Solarzellen durchgelassen, weshalb der Wirkungsgrad hoch ist. Der spezielle Schichtaufbau im Kontext mit einer optimierten Texturierung der Moduldeckglas-Oberfläche ermöglicht zudem eine sehr hohe Farbsättigung und Farbhomogenität sowie eine außergewöhnlich gute Winkelstabilität unter verschiedenen Betrachtungsrichtungen. Diese Struktur kann großflächig hergestellt werden und lässt sich einfach in den PV-Modul-Produktionsprozess integrieren, da lediglich ein entsprechend vorprozessiertes Deckglas verwendet werden muss. Die Oberflächen können matt oder metallisch glänzend sein und weisen einen reduzierten Blendeffekt auf, dabei bleiben die Solarzellen hinter der Farbschicht unsichtbar. Somit bieten MorphoColor® beschichtete PV-Module für die Architekt:innen und Bauplaner:innen einen großen gestalterischen Spielraum bei der farblichen Gestaltung der Fassaden [3].

Im Rahmen des Vorhabens EnStadt:Pfaff wurde eine MorphoColor®-PV-Fassade als einer der ersten PV-Anlagen in Deutschland mit dieser innovativen Technologie an der Energiezentrale im Pfaff-Gelände installiert. Damit wurde nachgewiesen, dass die Umsetzung von PV-Fassaden mit einer hochwertigen Ästhetik und einer hohen Effizienz möglich ist. Die Umsetzung der Demonstrationsanlage im Pfaff-Real-labor hat es des Weiteren auch ermöglicht, die konkreten Herausforderungen bei der Planung und Umsetzung sowie der Einholung der erforderlichen bauordnungsrechtlichen Genehmigungen zu ermitteln und damit Erfahrungen bei der Realisierung innovativer PV-Fassaden zu sammeln. Daraus wurden im Vorhaben Erkenntnisse abgeleitet, die im Folgenden erläutert werden und zu einfacheren Umsetzung weiterer PV-Anlagen beitragen sollen.

Im Pfaff-Quartier werden die rot gefärbte MorphoColor®-PV-Module in der oberen Hälfte der Südost und der Südwest-Fassade des Neubaus der Energiezentrale eingesetzt (siehe Abbildung 2). Sie wurden farblich abgestimmt mit den Faserzement-Fassadenplatten, die an den restlichen Fassadenteilen eingesetzt werden. Die Farbe wurde mit den Städteplanern und dem Denkmalschutz abgestimmt, da die Energiezentrale neben der denkmalgeschützten Pforte steht und die Farben der Gebäude sich entsprechend der Vorgaben des Pfaff-Gestaltungshandbuchs am typischen Pfaff-Rot orientieren müssen [4]. Mit dem Farbton „Morpho Rot“ der MorphoColor®-PV-Module konnte hier eine gute Lösung gefunden werden.



Abbildung 2: Rendering der Energiezentrale im Pfaff-Quartier, Darstellung der Südost- und Südwest-Fassade, die in der oberen Hälfte als PV-Fassade ausgeführt wird, Quelle: RBS wave

In diesem Bericht wird zuerst die im Pfaff-Quartier demonstrierte PV-Anlage vorgestellt. Dann wird der allgemeine Planungsprozess von PV-Fassadenanlagen mit seinen besonderen Herausforderungen beschrieben. Im dritten Teil werden die umfangreichen Erfahrungen aus dem Planungsprozess für die MorphoColor®-PV-Fassade an der Energiezentrale im Pfaff-Quartier geschildert. Im vierten Berichtsabschnitt wird die Ertrags- und Verschattungsanalyse für die PV-Fassade der Energiezentrale vorgestellt und erläutert, welche Effekte den Solarstromertrag an der PV-Fassade der Energiezentrale in welchem Umfang mindern und mit welchen Stromerträgen zu rechnen ist. Abschließend werden die Erkenntnisse aus der Planung und Umsetzung der PV-Fassade im Pfaff-Quartier beschrieben, die dazu beitragen sollen, die Planung und Umsetzung künftiger PV-Fassadenanlagen zu erleichtern.

2 Beschreibung der demonstrierten PV-Fassade

2.1 Bedeutung innovativer Lösungen bei PV-Fassaden

BIPV-Anlagen (gebäudeintegrierte PV / building integrated PV) lassen sich in die Gebäudehüllen integrieren und ermöglichen somit ästhetisch und architektonisch ansprechende Anlagen zur Solarstromerzeugung. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für deren Umsetzung in der Breite. Zur Gebäudeintegration gehört auch eine farbliche Anpassung der PV-Module an das Farbkonzept eines Gebäudes, insbesondere bei PV-Fassaden als eine wichtige Gruppe der BIPV-Anlagen. Deshalb ist die Verfügbarkeit von farbigen PV-Fassadenmodulen in einer großen Farbpalette eine weitere wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Verbreitung im Markt. Dabei darf die ursprüngliche Motivation für ihren Einsatz, nämlich klimaneutral Solarstrom zu erzeugen, nicht zu stark eingeschränkt werden. Der Einsatz von innovativen, farbigen Beschichtungstechnologien, die den Stromertrag der PV-Module nur wenig reduzieren, löst

dieses Problem. Mit der MorphoColor®-Farbtechnologie hat das Fraunhofer ISE eine solche Technologie entwickelt [2].

Die Verfügbarkeit von farbigen PV-Modulen ist eine grundlegende, jedoch nicht ausreichende Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung von PV-Fassadenanlagen. Wichtig ist auch die gute und effiziente Integration der spezifischen Planungsschritte der Anlagen in den konventionellen Bauplanungsprozess. Dabei gibt es in der Praxis noch viele Herausforderungen, wie die Planung der PV-Fassade für die Energiezentrale im Rahmen von EnStadt:Pfaff zeigte.

Das Verständnis der spezifischen Planungsschritte für PV-Fassaden und der Rollen der verschiedenen Beteiligten ist für eine erfolgreiche Planung einer BIPV-Anlage von essenzieller Bedeutung. Dazu gehört u.a. die Ermittlung der für die PV-Module geeigneten Flächen in der Gebäudehülle sowie die Berücksichtigung der bautechnischen und elektrischen Anforderungen bei der Planung und Realisierung. Aufgrund der Beteiligung der verschiedenen Gewerke ist das Fachwissen und die Zusammenarbeit von Expert:innen aus den Bereichen Architektur, Fassadenbau, Photovoltaik und Elektrik unabdingbar, um ästhetisch hochwertige, ertragsstarke und bautechnisch sichere BIPV-Anlagen erfolgreich und kosteneffizient zu realisieren. Der generelle Planungsprozess von BIPV-Anlagen ist in Kapitel 3 beschrieben.

2.2 Die Energiezentrale im Pfaff-Quartier

Wenn man das Pfaff-Quartier durch die ehemalige Pforte betritt, schließt sich gleich rechts die neu im Rahmen des Vorhabens EnStadt:Pfaff errichtete Energiezentrale an (siehe Abbildung 3). Sie steht somit neben der unter Denkmalschutz stehenden Pforte und gegenüber dem ebenso denkmalgeschützten neuen Verwaltungsgebäude, das heute als Medizinisches Versorgungszentrum (MVZ) genutzt wird.

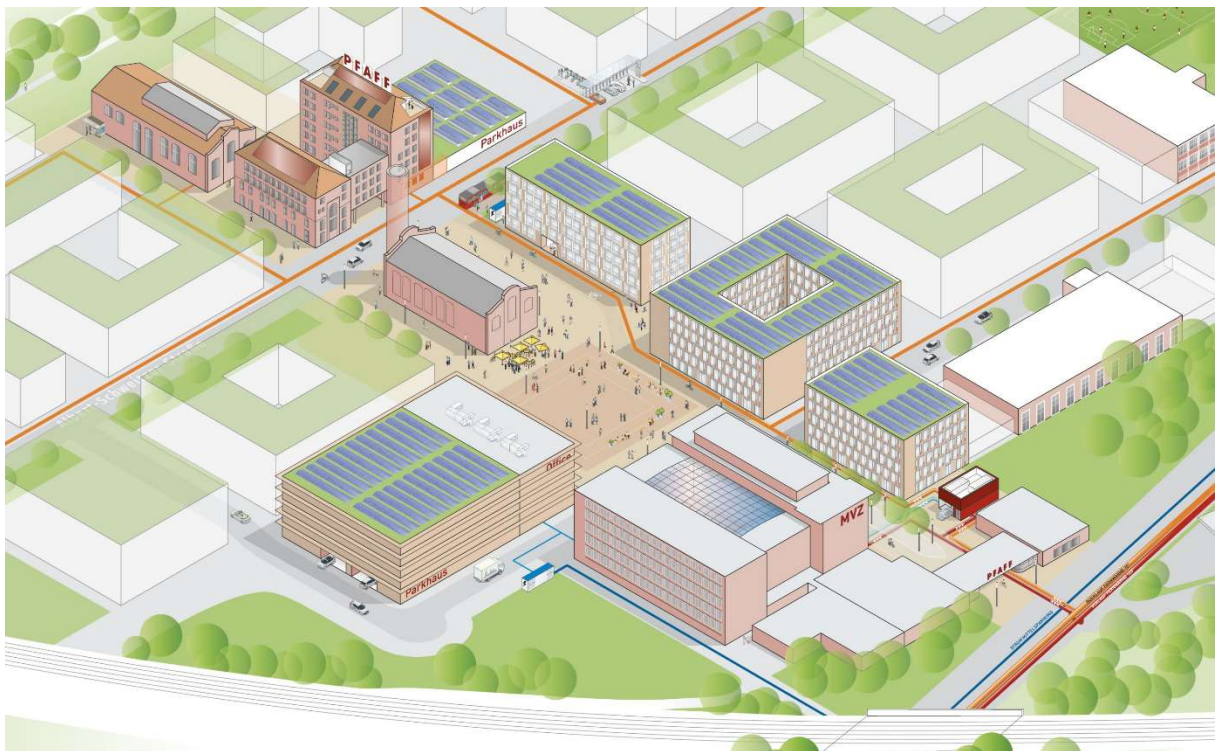


Abbildung 3: Reallabor-Bereich des Pfaff-Quartiers in Kaiserslautern mit der Energiezentrale (roter Kubus rechts unten, neben der Pforte liegend), Quelle: Triolog / EnStadt:Pfaff

Mit der Pforte und dem MVZ, die bereits saniert und in Betrieb sind, bildet die Energiezentrale ein Ensemble im gestalterisch sensiblen Eingangsbereich zum Pfaff-Quartier, weshalb die architektonischen Anforderungen weit über die Anforderungen an eine übliche Energiezentrale hinausgehen. Die Architektur wurde mit den Stadtplanern und der Denkmalschutzbehörde abgestimmt. Dabei wurde insbesondere die Kubatur festgelegt. So liegt die Fassade der Energiezentrale zur Straße hin in einer Flucht mit der Fassade der Pforte und die Gebäudehöhe ist identisch mit der Pforte. Natürlich wurde auch die Materialität und die Farbe der Fassade der Energiezentrale auf die Fassade der Pforte und dem MVZ abgestimmt. Zum Einsatz kommen in der oberen Hälfte der Südost- und Südwestfassade rote MorphoColor®-PV-Module sowie an den sonstigen Fassadenteilen rote Faserzement-Platten. Somit grenzt sich die Energiezentrale als Quader mit moderner burgunderroter Fassade klar als wichtiger Baustein der zukunftsorientierten Gestaltung des Pfaff-Quartiers von den benachbarten denkmalgeschützten Gebäuden ab, gliedert sich aber trotzdem gut in das Ensemble ein durch die Fortsetzung der Dimensionen der Bestandsgebäude und Abstimmung mit deren Farbwelt.

Die Architektur der Energiezentrale und ihr Raumprogramm resultiert aus verschiedenen Bedarfen, die sich aus der Wärmeversorgung des Quartiers und den geplanten Demonstratoren im Rahmen von EnStadt:Pfaff ergaben. Die wichtigste Funktion ist die Bereitstellung des Raumes für die Heizzentrale. Diese musste sich in der Nähe der Königstraße befinden, an der die Pforte des Pfaff-Quartiers liegt. Denn die Nahwärmeversorgung des Pfaff-Quartiers wird vornehmlich aus dem Rücklauf der städtischen Fernwärme versorgt und ist deshalb an der Fernwärmeleitung in der Königstraße angeschlossen. Auf dem Dach der Heizzentrale befinden sich zwei Kältemaschinen, die das MVZ mit Kälte versorgen, wobei die Abwärme der Kälteerzeugung in der Heizzentrale ins Wärmenetz eingespeist wird. Ein zweiter Raum in der Energiezentrale beherbergt ein E-Mobil- und Batterielabor. In diesem befindet sich ein DC-System (Gleichstrom-System), an dem zwei Batterien, die PV-Anlage sowie ein DC-Schnellladepunkt angeschlossen sind. Im Labor werden Untersuchungen zum Bidirektionalen Laden von E-Fahrzeugen durchgeführt, das den Strom aus den Fahrzeugbatterien auch zur Stabilisierung des Stromnetzes nutzt. Des Weiteren wurde ein Teil der Fassade als Photovoltaik-Fassade ausgeführt, um einerseits Solarstrom für das E-Mobil- und Batterielabor zur Verfügung zu stellen und andererseits innovative farbige PV-Fassadenmodule zu demonstrieren. Die Komponenten der Energiezentrale sind in Abbildung 4 dargestellt.

Die Bündelung der verschiedenen Funktionen im Gebäude der Energiezentrale wurde notwendig, da das Gebäude des neuen Kesselhauses (Gebäude mit Schornstein in der Mitte von Abbildung 3) aufgrund mangelnder Bausubstanz entgegen der Planung nicht von der Stadt saniert werden konnte und damit für das von EnStadt:Pfaff geplante E-Modul- und Batterielabor nicht mehr zur Verfügung stand. Auch der geplante Solarcarport und damit die E-Mobil-Ladepunkte konnten neben dem Kesselhaus nicht realisiert werden. Da die MorphoColor®-PV-Module zum Zeitpunkt der Umsetzung der PV-Fassadenanlage am alten Verwaltungsgebäude (Gebäude mit dem PFAFF-Schriftzug auf dem Dach in Abbildung 3) noch nicht zur Verfügung standen, wurden dort konventionelle farbige PV-Module eingesetzt und die innovativen MorphoColor®-PV-Module in der Fassade der Energiezentrale demonstriert.

Mit den burgunderroten Faserzement-Fassadenplatten in der unteren Hälfte und den burgunderroten PV-Modulen in der oberen Hälfte der Süd-Ost- und der Süd-West-Fassade weist der als Quader ausgeführte Baukörper der Energiezentrale eine moderne, zukunftsweisende Ästhetik auf, die einerseits im klaren Kontrast zur benachbarten Pforte und dem gegenüberliegenden MVZ steht und andererseits Elemente dieser denkmalgeschützten Bestandsgebäude aufnimmt und in Farbe, Dimensionierung und

Kubator fortsetzt, wodurch sich ein architektonisch hochwertiges Ensemble im Eingangsbereich des Pfaff-Quartiers ergibt.

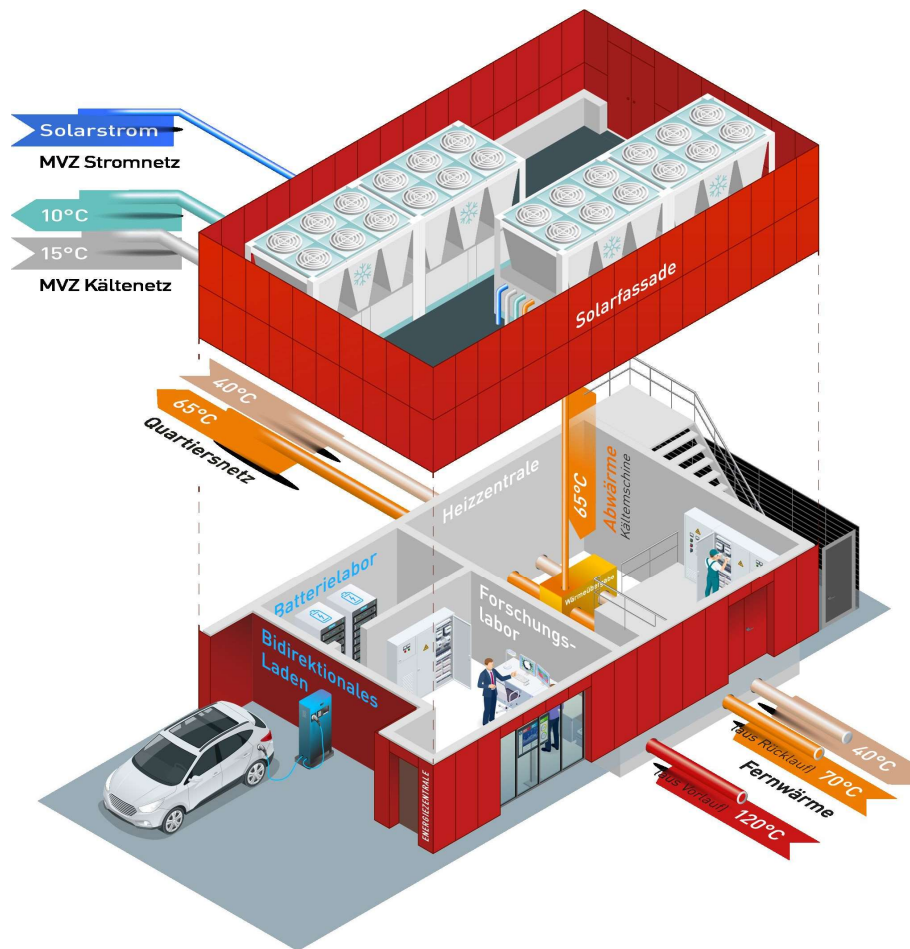


Abbildung 4: Ansicht der Energiezentrale des Pfaff-Quartiers mit ihren verschiedenen Komponenten und Funktionen
Quelle: Triolog / EnStadt: Pfaff

2.3 PV-Fassadenanlage mit MorphoColor®-Modulen an der Energiezentrale

Die Größe der PV-Fassadenanlage ergab sich aus der vollständigen Nutzung der solargeeigneten Fassadenfläche der Energiezentrale. Die Nordost- und Nordwestfassaden wurden als Installationsort von vornherein ausgeschlossen, da die auftreffende Solarstrahlung und damit der Solarstromertrag nur weniger als die Hälfte des Ertrags auf die Südost- und die Südwestfassade beträgt. Aufgrund der erhöhten Verschattung und auch der Problematik möglicher Beschädigungen, wurden auch die Fassadenflächen im Erdgeschoss ausgeschlossen. Somit wurde die vollflächige Belegung der oberen Hälfte der Südost- und Südwestfassade mit PV-Modulen beschlossen. Daraus ergibt sich eine Modulfläche von 60,1 m² mit einer elektrischen Leistung von 10,1 kWp (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Fläche und Leistung der PV-Fassaden an der Energiezentrale

Modulfläche Südost-Fassade	37,2 m ² (Leistung: 6,2 kWp)
Modulfläche Südwest-Fassade	22,9 m ² (Leistung: 3,9 kWp)
Gesamt	60,1 m ² (Leistung: 10,1 kWp)

Wie oben beschrieben, wurden rote PV-Module mit MorphoColor®-Beschichtung eingesetzt, deren technische Daten in Tabelle 2 aufgelistet sind. PV-Fassadenmodule sind aus Gründen der Sicherheit und Lebensdauer meistens Glas-Glas-Module, d.h. die Vorderseite und die Rückseite bestehen jeweils aus einer Glasscheibe. Die Glasscheiben sind jeweils 4 mm dick und bestehen aus Teilvorgespannten (TVG) Sicherheitsglas. Eingesetzt werden hocheffiziente monokristalline Siliziumsolarzellen. Die quadratischen Solarzellen sind einmal halbiert (Half-cut) und nur auf der Rückseite mit den elektrischen Leitern kontaktiert (RearCon Technologie). Dadurch ergibt sich eine hohe Moduleffizienz von bis zu 23,2 % (ohne Farbbeschichtung) [5]. Durch die MorphoColor®-Beschichtung ergibt sich der Farbton „Morpho rot“ [3].

Tabelle 2: Kenndaten der PV-Module mit MorphoColor®-Beschichtung, die an der Energiezentrale eingesetzt werden

Farbbezeichnung:	Morpho rot
Typ Solarzellen:	Megasol RearCon M6 Half-cut
Frontglas:	TVG 4,0 mm
Busbars:	Unsichtbar (rückseitig)
Verkapselungsmaterial:	EVA
Rückseitenglas:	TVG 4,0 mm
Moduldicke:	9,5 mm ± 2 mm
Brandverhalten (EN 13501-1):	B - s1, d0
Schutzklasse:	II (Brandklasse A nach IEC 61703-2)

3 Allgemeiner Planungsprozess einer BIPV-Anlage

3.1 Vorgehensweise bei der Planung einer BIPV-Anlage

Fundierte Kenntnisse der relevanten Planungsinhalte von BIPV- und damit auch PV-Fassadenanlagen sind die Voraussetzung für einen systematischen Planungsansatz und den Abbau von Vorbehalten bei

den Fachplanenden. Idealerweise wird die BIPV gleich vom Anfang des Planungsprozesses bzw. schon in der Wettbewerbsphase bei Neubauten und während der Machbarkeitsstudie bei Sanierungen mitberücksichtigt. Denn die BIPV kann den architektonischen Entwurf, die Gebäudeenergie- und Nachhaltigkeitskonzepte und die Wirtschaftlichkeit der Projekte direkt und deutlich beeinflussen, je nach Zielsetzung. Erste technologische Varianten sowie Produktverfügbarkeit und Anforderungen aus bauordnungsrechtlichen Vorschriften müssen früh im Planungsprozess (mit der Fokussierung auf Leistungsphasen 1 bis 3) berücksichtigt werden.

Als Ausgangspunkt für einen generellen systematischen Ansatz dient die deutsche Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) [6], die für die Objektplanung (Gebäude) in neun Leistungsphasen gegliedert ist wie folgt:

- 1) Grundlagenermittlung
- 2) Vorplanung
- 3) Entwurfsplanung
- 4) Genehmigungsplanung
- 5) Ausführungsplanung
- 6) Vorbereitung der Vergabe
- 7) Mitwirkung bei der Vergabe
- 8) Objektüberwachung – Bauüberwachung und Dokumentation
- 9) Objektbetreuung

In manchen Fällen wird der ersten Leistungsphase (LP) noch die LP 0 vorangestellt. Diese entspricht bei Neubauten der Wettbewerbsphase und bei Sanierungen der Machbarkeitsstudie.

Der BIPV-Planungsprozess und die Leistungsphasen lassen sich zur besseren Strukturierung in einzelne, relevante Teilprozesse unterteilen. Bei diesen handelt es sich um:

- den architektonischen Entwurf,
- die Konstruktionsplanung und das Führen des statischen Nachweises,
- die Brandschutzplanung,
- die Wirtschaftlichkeitsberechnung,
- die Nachhaltigkeitsbeweissführung,
- das Einbetten der BIPV-Anlage in ein gesamtheitliches Energiekonzept,
- die Solarertragsberechnung und
- die Elektroplanung für die BIPV-Anlage.

Die Teilprozesse unterliegen, abhängig von der Leistungsphase, einer unterschiedlichen Priorisierung und sind verschiedenen Akteur:innen zugeordnet, die jeweils spezifische Aufgaben und Verantwortlichkeiten (u.a. eine lückenlose Dokumentation der Teilprozessbearbeitung) wahrzunehmen haben. Wesentliche Akteur:innen im Planungsprozess von BIPV-Anlagen sind u.a.:

- Gebäudeeigentümer:in
- Gebäudenutzer:innen
- Gebäudebetreiber:in
- Generalunternehmer:in
- Architekt:in oder Planer:in
- Ingenieur:in für das strukturelle Konzept
- Ingenieur:in für die Fassade/das Dach
- Techniker:in für den Brandschutz
- Techniker:in für die PV-Anlage
- Ingenieur:in für das elektrische Konzept
- Ingenieur:in für das Energiekonzept

Auf den BIPV-Planungsprozess wird hier nicht weiter eingegangen. Ausführliche Beiträge zur Analyse und Beschreibung des BIPV-Planungsprozesses sind beispielsweise in den Arbeiten von C. Hemmerle [7] und F. Ensslen et al. [8] dargestellt. Ein praxisbezogener, systematischer Ansatz für die BIPV-Planung, der auf den Leistungsphasen (LP) des üblichen deutschen Planungs- und Bauprozesses für Gebäude als ordnendes Gerüst aufbaut, wird von Wilson et al. vorgestellt [9]. Ausgehend von einem idealen Planungsablauf für BIPV-Anlagen werden dort die relevanten Planungsteilprozesse mit ihren einzelnen Aufgaben und Beteiligten, je nach Leistungsphase, in Ablaufdiagrammen dargestellt. Als weiteres Hilfsmittel dient eine Schnittstellenmatrix, die BIPV-AkteurInnen, ihre Verantwortlichkeiten für die Teilprozesse und dazugehörige Schnittstellen zuordnet, die für ein Großprojekt als Beispiel angewandt werden.

3.2 Weitere Informationsquellen zur Planung von PV-Fassaden

Das Angebot von PV-Fassaden als wichtiger Teil der gebäudeintegrierten Photovoltaik (BIPV) hat mit der MorphoColor®-Beschichtungstechnologie eine wichtige Erweiterung erfahren. Damit ist das Spektrum der Farben von PV-Modulen wie auch die Farbintensität und die Homogenität der Farbgebung deutlich erweitert worden bei gleichzeitig signifikanter Verbesserung der Effizienz. An der Energiezentrale im Pfaff-Quartier in Kaiserslautern wurde eine der ersten Pilotanlagen errichtet.

Für die innovative PV-Fassadenanlagen gelten allerdings dieselben spezifischen Grundlagen wie für alle anderen BIPV-Anlagen, die für ein erfolgreiches PV-Fassadenprojekt berücksichtigt werden sollten. Die Allianz Bauwerksintegrierte Photovoltaik e.V. hat allgemeine Informationen zu BIPV-Anlagen erarbeitet und bereitgestellt. Dies sind insbesondere Informationen zu den technischen Baubestimmungen [10] sowie zum Brandschutz bei BIPV-Anlagen [11].

Die BIPV-Initiative Baden-Württemberg hat zudem einen Online-Leitfaden (www.bipv-bw.de) erstellt, der die relevanten Aspekte einer **BIPV-Anlage im Planungsprozess** erläutert und entsprechende Informationen bereitstellt [12]. Da diese Struktur die Vielfalt der zu berücksichtigenden Themen bei der BIPV-Planung und Umsetzung deutlich macht, ist diese Struktur hier dargestellt:

- 1) Planungsaspekte nach Leistungsphasen

- a. Flächenpotenziale
 - b. Übersicht nach HOAI
- 2) Bauherr
 - a. Betreibermodelle
 - b. Wirtschaftlichkeit
 - c. Fakten gegen Mythen
 - d. Förderung und Forderung
- 3) Architektur
 - a. Information zu verfügbaren Produkten
 - b. Bauordnungsrechtliche Grundlagen
 - c. Konstruktive Details und Anwendungsbeispiele
 - d. Fachplanung
- 4) Energie und Nachhaltigkeit
 - a. Leistung und Ertragsprognosen
 - b. Einbindung in das Energiekonzept
 - c. Technische Details (U-Werte, G-Werte)
 - d. Ökobilanz
- 5) Fachplanung Elektro und Gebäudetechnik
 - a. Komponenten einer PV-Anlage
 - b. Systemkomponenten und Kabelführung von BIPV
 - c. Elektrotechnische Details und Sicherheit
 - d. Anlagenüberwachung
- 6) Fachplanung Konstruktion Statik und Brandschutz
 - a. Konstruktive Anforderungen bei der Integration
 - b. Statische Dimensionierung von BIPV-Elementen
 - c. Bemessung des Montagesystems von PV-Anlagen
 - d. Brandverhalten von BIPV-Anlagen

4 Erfahrungen aus der Planung und Umsetzung der PV-Fassade im Pfaff-Quartier

4.1 Planungsprozess

Bei der Beplanung und der Realisierung der MorphoColor®-PV-Fassade an der Energiezentrale im Pfaff-Quartier Kaiserslautern musste eine Vielzahl von Themen berücksichtigt und bearbeitet werden. Dabei wurde die Stadt Kaiserslautern als Bauherrin und das mit der Planung und Umsetzung der Energiezentrale beauftragte Planungsbüro RBS wave vom Fraunhofer ISE begleitet und beraten. Relevante Themen waren dabei:

- (Farbige) Modultechnologien
- Technologiereife und Verfügbarkeit der PV-Module
- Gestaltung und Design der PV-Fassade
- Unterkonstruktion der PV-Fassade und deren Befestigung
- Ausschreibung und Vergabe der PV-Anlage unter Berücksichtigung der zu demonstrierenden innovativen Modultechnologie
- Installation und Inbetriebnahme der PV-Anlage mit Netzanmeldung
- Monitoring der PV-Anlage
- Fremddienstleistungen und Schnittstellen zwischen den Gewerken
- Kosten und Finanzierung
- Bauordnungsrechtliche Anforderungen (gebäudespezifische Anforderungen)
- (Bau-) Genehmigungen (Statik, vorhabenbezogene Bauartgenehmigung, Brandschutz)
- Zeit-, Projekt- und Systemplanung
- Entscheidungswege und Verantwortlichkeiten

Im Vorfeld des Planungsprozesses der PV-Fassade wurde mit den Verantwortlichen der Stadt Kaiserslautern als Bauherrin der Energiezentrale und dem Planungsteam die Vorteile der innovativen MorphoColor®-Farbtechnologie erörtert. Dabei stand im Zentrum, die visuellen und Effizienzvorteilen gegenüber anderen farbigen PV-Modulen sowie mögliche Herausforderungen wie die Beschaffung der neu am Markt befindlichen Produkte und die höheren Kosten abzuwägen. Eine Bemusterung der PV-Module wurde durchgeführt, um nachzuweisen, dass sie die hohen farblichen Anforderungen an die PV-Fassade seitens der Bauherrschaft sowie des Denkmalschutzes erfüllt werden. Durch die Informationen über die Verfügbarkeit und Integrierbarkeit von farbige PV-Modulen konnte erreicht werden, dass von der Stadtplanung die Installation von PV-Fassadenanlagen trotz hohem gestalterischem Anspruch im Bebauungsplan und dem Gestaltungshandbuch zugelassen wurde [4, 13].

Zur Vorbereitung der Ausschreibungsunterlagen durch das Planungsbüro RBS wave wurden die notwendige Spezifikation für die geplanten farbigen PV-Module erarbeitet, welche zuvor mit dem Modulhersteller abgestimmt worden war. Modultechnologische Details bei der Entwicklung eines ästhetisch

ansprechenden und praktikablen PV-Fassadendesigns wurden diskutiert. Die vorbereiteten Ausschreibungstexte wurden in Bezug auf die gesamte BIPV-Anlage geprüft und im Planungsteam abgestimmt.

Die Ausschreibung der innovativen MorphoColor®-PV-Fassade stellte sich in der Praxis als große Herausforderung dar, weshalb der Prozess im folgenden Kapitel genauer beschrieben ist. Dies lag u.a. daran, dass der Stahlbau, die konventionelle und die PV-Fassade gemeinsam ausgeschrieben wurden, die Kosten höher lagen, als erwartet und die Kommune eine herstellerunabhängige öffentliche europäische Ausschreibung durchführen musste.

Abbildung 5 zeigt einen Schnitt durch die Energiezentrale mit den Räumen für das E-Mobil- und Batterielabor sowie der Heizzentrale im Erdgeschoss und den zwei Kältemaschinen auf dem Dach. Für die Montage der Fassade im oberen Bereich wurden Stahlträger auf der Attika montiert. An diese ist eine Unterkonstruktion angebracht, die in Südost- und Südwestrichtung die PV-Module und in Nordost- und Nordwestrichtung die Faserzementplatten montiert sind. Deshalb war der Stahlbau ein notwendiger Teil der Ausschreibung der Fassade. Die PV-Module wurden im Leistungsverzeichnis so spezifiziert, dass die im Forschungsvorhaben EnStadt:Pfaff vorgesehene innovative Beschichtungstechnologie auch tatsächlich zum Zuge kam. Hierzu wurden die technischen Parameter in Bezug auf die Farbigkeit und Effizienz als Kriterien definiert, die die MorphoColor®-Beschichtung besonders auszeichnen. Da zum Zeitpunkt der Ausschreibung nur ein Lieferant für die PV-Module bekannt war, bezog sich der Wettbewerb nicht auf das Produkt selbst (PV-Module), sondern auf die Unterkonstruktion und die Erstellung der Fassade.



Abbildung 5: Schnitt durch die Energiezentrale, Quelle: RBS wave

Eine Herausforderung in der Planung und Umsetzung war der Umgang mit den Schnittstellen zwischen PV-Fassade und der konventionellen Fassade. Diese war zuerst als Streckmetallfassade geplant. Aus Kostengründen musste die Planung korrigiert werden zugunsten einer Fassade mit HPL-Platten (Hochdrucklaminat). Aufgrund von Brandschutzanforderungen musste jedoch auch diese Planung nochmals geändert werden, so dass nun eine Fassade mit Faserzementplatten zur Ausführung kam. Da die PV-

Fassade und die Faserzement-Fassade direkt aneinandergrenzen, wurde auf eine gute Abstimmung der beiden Gewerke geachtet. Dies bezieht sich auf die farbliche Abstimmung, auf die Formate der Module und Platten, welche dieselbe Breite aufweisen, so dass ein und dieselbe Rasterung der beiden Fassadentypen auf der Südost- und der Südwestseite besteht. Weiter wurden die Anschlüsse und die Unterkonstruktion abgestimmt.

Die MorphoColor®-PV-Module haben vorne und hinten eine Glasscheibe als Abdeckung und sind als rahmenlose Glas-Glas-Module ausgeführt. Auf der Rückseite sind zwei Backrails (Montageschienen) aufgeklebt, so dass von der Vorderseite nur die Glasoberflächen und keine Befestigungselemente sichtbar sind. Die PV-Module werden mit Abständen von ca. 11 mm Breite montiert und wurden in Bezug auf ihre Größe nach Kundenwunsch gefertigt. An der Energiezentrale werden auf der Südost-Fassade 32 PV-Module mit einer Größe von 780 mm x 1.500 mm und auf der Südwest-Fassade 20 PV-Module mit einer Größe von 770 mm x 1.500 mm eingesetzt. So konnten auf beiden Fassadenseiten eine vollflächige Belegung mit derselben Modulgröße bei fast identischen Spaltbreiten erreicht werden. Abbildung 6 zeigt die Ansicht der Südost-Fassade mit zwei PV-Modulreihen oben und einer Reihe mit Faserzementplatten unten im selben Raster und Abbildung 7 die entsprechende Ausführungsplanung der PV-Anlage.

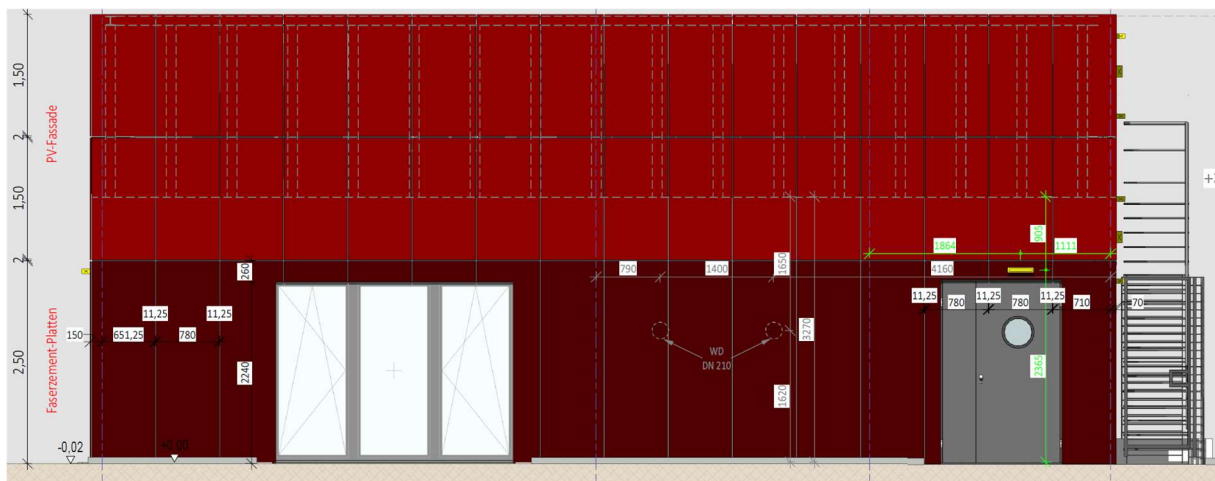


Abbildung 6: Ansicht der Südost-Fassade der Energiezentrale, Quelle: RBS wave

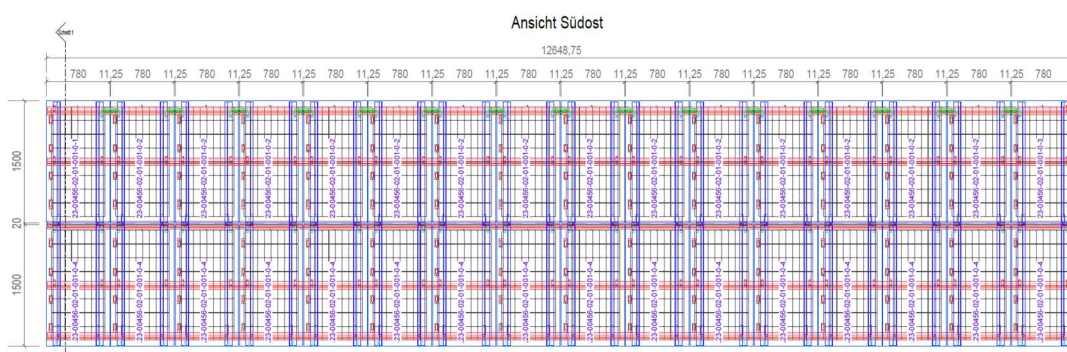


Abbildung 7: Ausführungsplanung der PV-Fassade auf der Südost-Seite der Energiezentrale, Quelle: Megasol

Die rahmenlosen Glas-Glas-PV-Module werden verdeckt befestigt. Dazu wurde das Montagesystem FAST 2 von der Firma Megasol eingesetzt. Abbildung 8 zeigt im linken Bild, wie die Tragschienen horizontal an der Wand angebracht werden. In diese Tragschienen werden dann die Haken eingehängt, die auf der Rückseite der PV-Module an die aufgeklebten senkrechten Backrails (Montageschienen)

geschraubt sind. Die Befestigung, Feinjustierung und Sicherung erfolgt von der Fassadenvorderseite mittels Inbus-Schrauben, die in den Spalten zwischen den Modulen zugänglich sind. Dies erlaubt die Erstellung einer glatten Glasfassade.



Abbildung 8: FAST 2 Montagesystem für verdeckte Montage der PV-Module, links: horizontale Tragschienen, rechts: PV-Modul mit aufgeklebtem Backrail und Haken, der in die Tragschiene eingehängt wird, Quelle: Megasol [14]

Bei der Planungsvorbereitung der PV-Fassade und dem Verschaltungs- und Wechselrichterkonzept ergaben sich Fragen zur Verschattung der PV-Flächen an der Süd-West- und der Süd-Ost-Seite der Energiezentrale durch die Nachbarbebauungen. Fraunhofer ISE führte dazu eine umfassende Einstrahlungsanalyse durch und ermittelte den erwartenden Ertrag an solarer Einstrahlung sowie an elektrischem Strom an den verschiedenen ausgerichteten PV-Flächen mit MorphoColor®-Modulen und im Vergleich zu anderen Modultypen. Die Ergebnisse können als Grundlage für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendet werden. Darüber hinaus erlauben sie die Abschätzung der Eigenstromnutzung und können als Benchmark für das Monitoring im späteren Betrieb dienen. Die Methodik und Ergebnisse dieser Verschattungs- und Ertragsanalyse sind in Kapitel 5 dargestellt.

Entsprechende Fachexpertise wurde ebenfalls bei der Vorplanung des Monitoringkonzepts benötigt. Die benötigte Anzahl von Einstrahlungs- und Temperatursensoren an den PV-Fassadenmodulen und der besten Befestigungsorte wurden ermittelt. Als Grundlage für ein fundiertes Konzept diente auch die Einstrahlungsanalyse.

Nach Beauftragung des Lieferanten der PV-Fassade wurde die Einholung einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG) und der Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für die PV-Fassade erforderlich, da für die MorphoColor®-PV-Module in der Kombination mit der Unterkonstruktion zum Zeitpunkt der Beauftragung noch keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) vorlag. Ein entsprechendes Zulassungsverfahren war zwar vom Hersteller Megasol schon vor geraumer Zeit angestoßen worden, allerdings war das zeitaufwändige Verfahren noch nicht abgeschlossen. Verzögerungen bei der Markteinführung innovativer Bauprodukte aufgrund langwieriger Zulassungsverfahren sind nicht unüblich, da aufgrund ihrer Neuheit verschiedene Prüfungen erforderlich sind. Allerdings können auch bei der Demonstration innovativer Produkte im Rahmen von Forschungsprojekten aus Sicherheitsgründen im öffentlichen Raum nur zugelassene Produkte eingesetzt werden. Deshalb wurde die Erstellung eines Gutachtens und die Antragstellung auf die Zustimmung im Einzelfall erforderlich. Der Prozess wurde im Rahmen von EnStadt:Pfaff vom Fraunhofer ISE koordiniert und ist in Kapitel 4.3 beschrieben.

4.2 Ausschreibung der Fassaden der Energiezentrale

Die Ausschreibung und Vergabe der Leistungen zur Lieferung und Montage der konventionellen und der PV-Fassade an der Energiezentrale hat sich als große Herausforderung erwiesen. Der Ausschreibungsprozess war wesentlich zeitaufwändiger und die Preise waren höher als erwartet, was zu Umplanungen führte und zusätzliche Zeitverzögerungen mit sich brachte. Der Prozess ist im Folgenden beschrieben.

Im April 2023 erfolgte die erstmalige Ausschreibung der Fassade der Energiezentrale für die Lieferung und Erstellung der Gesamtfassade, d.h. der Stahlbaukonstruktion auf der Attika, der Streckmetallfassade und der PV-Fassade mit jeweiliger Unterkonstruktion. Es war erwartet worden, dass ein Fassadenbauer alle Leistungsteile anbietet, was den Vorteil hat, dass mögliche Schnittstellenprobleme zwischen den Gewerken vom Auftragnehmer gelöst werden und die Gewährleistung durch einen Anbieter erfolgt. Aufgrund der Beschaffungsregeln für das Pfaff-Quartier musste die Ausschreibung durch die Stadt Kaiserslautern europaweit durchgeführt werden.

Die Unterlagen der ersten Ausschreibung wurden zwar von einigen Unternehmen vom elektronischen Vergabeportal heruntergeladen, allerdings wurde kein Angebot abgegeben. Dies lag vermutlich an den relativ hohen technischen Anforderungen durch die Kombination zweier verschiedener Fassadentechnologien, an den relativ geringen Erfahrungen von Fassadenbauern bei der Umsetzung von PV-Fassaden und möglicherweise auch an Unsicherheiten bezüglich des Einsatzes der innovativen PV-Modulfarbtechnologie. Da es sich um ein relativ kleines Gebäude handelt, ist auch das Auftragsvolumen verhältnismäßig klein. Es wurde vermutet, dass dies ein wesentlicher Grund dafür ist, dass große Fassadenbauunternehmen, die eher Erfahrungen mit komplexen und anspruchsvollen Bauprojekten haben, sich nicht an der Ausschreibung beteiligt haben. Für kleinere und meist nur regional tätige Unternehmen dagegen stellt die Beteiligung an einer europaweiten Ausschreibung über das elektronische Vergabeportal einen relativ großen bürokratischen Aufwand dar und ist teilweise mit technischen Hürden verbunden, wie einige Firmen berichtet haben. Somit konnte in der ersten Ausschreibungsrunde kein Anbieter gefunden werden.

Im Juni 2023 wurde eine zweite Ausschreibung durchgeführt, nachdem vorab Kontakt zu möglichen Anbietern aufgenommen worden war, allerdings war auch diese nicht erfolgreich, da bis zum Ende der verlängerten Submissionsfrist wieder kein Angebot vorlag. Im September 2023 erfolgte deshalb eine dritte Ausschreibung, deren Frist aufgrund der Bitte eines interessierten Anbieters verlängert wurde. Allerdings sah sich dieses Unternehmen am Ende doch nicht in der Lage, ein Angebot abzugeben, da es nach interner Prüfung keine ausreichenden Kapazitäten für die Ausführung bereitstellen konnte. Somit war auch diese Ausschreibungsrunde nicht erfolgreich.

Die vierte Ausschreibung konnte im Dezember 2023 entsprechend dem Vergaberecht in „freier Vergabe“ durchgeführt werden, da die vorigen Ausschreibungen nicht erfolgreich waren. Im Vorfeld wurde mit möglichen Anbietern Kontakt aufgenommen und deren Fragen geklärt, um die Wahrscheinlichkeit der Angebotsabgabe zu erhöhen. Bis zur Submission im Januar 2024 wurden zwei Angebote abgegeben. Allerdings lagen die Preise beider Angebote wesentlich höher als der ermittelte Schätzpreis für die ausgeschriebenen Leistungen. In den Bietergesprächen wurden zwar Kostenreduktionsmöglichkeiten eruiert, doch reichten diese bei Weitem nicht aus, um den möglichen Budgetrahmen einhalten zu können. In der Folge musste die Ausschreibung aufgrund der hohen Preise aufgehoben werden.

Um die Kosten zu reduzieren, wurden in der Folge mehrere Umplanungen vorgenommen. So wurde die Streckmetallfassade nun durch eine Fassade mit HPL-Platten (Hochdrucklaminatplatten) ersetzt, die ebenfalls in verschiedenen Farben, aber zu günstigeren Preisen angeboten werden. Die Fassadenkonstruktion auf der Rückseite der Energiezentrale mit dem Aufgang zum Dach wurde vereinfacht. Weiter wurde auf die PV-Anlage auf dem Dach verzichtet, die als Referenzanlage geplant war und für die eine spezielle Aufständering erforderlich gewesen wäre.

Als weiterer Grund für die hohen Angebotspreise wurde die Ausschreibung aller Gewerke (Stahlbau, opake Fassade und PV-Fassade) in einem Los identifiziert. Die Ausführung durch einen Anbieter hat den Vorteil, dass die Gewährleistung für die Fassade von einem Unternehmen erfolgt und keine Abstimmungsprobleme zwischen den Gewerken auftauchen bzw. diese vom Auftragnehmer gelöst werden. Da Stahl- und Fassadenbauer aber üblicherweise keine Erfahrung mit der Planung und dem Bau von PV-Fassadenanlagen haben, sind deren Angebote für PV-Fassaden in der Regel teurer als von spezialisierten Unternehmen aufgrund von nicht optimierten Prozessen und/oder aufgrund von Risikoaufschlägen. Um dies zu vermeiden, wurde die Aufteilung der Ausschreibung in 3 Lose beschlossen: Dem Stahlbau, der herkömmlichen Fassade mit HPL-Platten und der PV-Fassade selbst. Die Ausschreibung umfasste alle 3 Lose, wobei Angebote entweder für ein einzelnes Los oder für mehrere Lose abgegeben werden konnten. Auf dieser Basis wurde erwartet, dass gegenüber dem ursprünglichen Schätznpreis noch verbleibende Preissteigerung im Budget aufgefangen werden kann.

Im Juni 2024 erfolgte auf dieser Basis die fünfte Ausschreibung für die Fassade der Energiezentrale in drei Losen. Aufgrund des veränderten Leistungsverzeichnisses musste diese wieder europaweit in einem offenen Verfahren erfolgen. Mit den Anbietern, die im Januar 2024 ein Angebot abgegeben hatten, wurde im Vorfeld über die Änderungen gesprochen und zusätzlich mit Photovoltaikunternehmen bezüglich des Loses PV-Fassade Kontakt aufgenommen. Auf dieser Basis gingen im Juli 2024 dann drei Angebote für den Stahlbau, ein Angebot für die HPL-Fassade und zwei Angebote für die PV-Fassade ein. Die Vergabe von Los 3 (PV-Fassade) musste allerdings aufgehoben werden, da ein Angebot nicht vollständig und das zweite Angebot deutlich teurer war. Durch die Aufhebung konnten die fehlenden Angaben (die für den Preis unwesentlich waren) vom ersten Anbieter nachgereicht werden.

Im September 2024 und damit 17 Monate nach der ersten Ausschreibung konnte so der Auftrag für den Stahlbau und die HPL-Fassade an die Firma Bard-Beckmann und der Auftrag für die PV-Fassade an die Firma Damm-Solar erfolgreich vergeben werden.

Folgende **Erkenntnisse** können aus dem Ausschreibungs- und Vergabeverfahren gewonnen werden:

- 1) **Die Ausschreibung und Vergabe von Aufträgen für innovative Komponenten sollte in einem möglichst einfachen Verfahren erfolgen**, in dem auch Unternehmen direkt angesprochen und mit diesen Lösungsansätze vorbesprochen werden können. Europaweite Ausschreibungen erschweren den Ausschreibungsprozess deutlich, insbesondere wenn das Auftragsvolumen relativ klein ist.
- 2) Ist wie im Pfaff-Quartier aus vergaberechtlichen Gründen eine europaweite Ausschreibung erforderlich, müssen **für den Ausschreibungsprozess genügend Zeit und Ressourcen eingeplant** und die Komplexität der angefragten Leistungen möglichst reduziert werden. Weiter sollten Barrieren im Verfahren möglichst vermieden werden (z.B. können Anbieter beim Zugang zum Vergabeportal unterstützt werden).

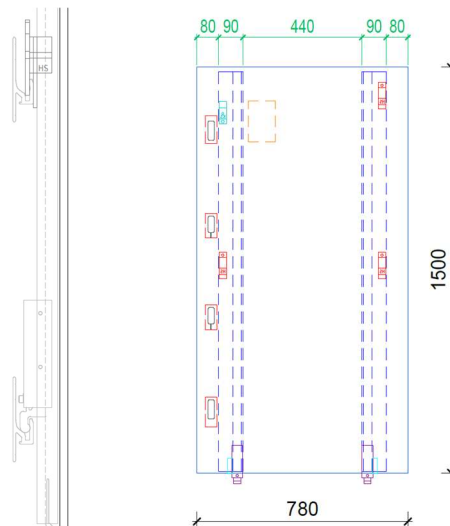
- 3) Die **Ausschreibung einer PV-Fassade als Teil der Gesamtfassade** und nicht als separates Los ist nur dann zu empfehlen, wenn Anbieter bekannt sind, die diese Leistungen tatsächlich erbringen können und daran interessiert sind, das vorgesehene Projekt umzusetzen. Diesbezüglich ist eine vertiefte Marktrecherche erforderlich, um beispielsweise zu ermitteln, ob das Projektvolumen für die Anbieter ausreichend attraktiv ist. Ansonsten wird eine Vergabe in Einzellosen empfohlen.
- 4) Die **Preise für innovative Komponenten** können aus verschiedenen Gründen (höhere Bezugspreise, höherer Aufwand bei Verarbeitung und Montage, Risikoaufschlag etc.) deutlich höher sein als für Komponenten, die im Markt bereits eingeführt sind. In der Budgetplanung und bei der Bewertung der Angebote sollte dies berücksichtigt werden.

4.3 Vorhabenbezogene Bauartgenehmigung und Zulassung im Einzelfall

Bauprodukte benötigen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) respektive allgemeine Bauartgenehmigung (aBG), um verwendet zu werden. Ist diese nicht vorhanden, wird eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) und Zustimmung im Einzelfall (ZiE) benötigt [10, 15, 16]. Da der Abschluss des vom Hersteller Megasol angestoßenen Prozesses zur Erlangung einer abZ für die MorphoColor®-PV-Module und ihre Unterkonstruktion zum Zeitpunkt der Beauftragung der PV-Fassade nicht absehbar war, wurde im Rahmen von EnStadt:Pfaff die Beantragung einer vBG und ZiE durchgeführt. In diesen Prozess waren verschiedene Akteure involviert.

Die Stadt Kaiserslautern als Bauherrin beauftragte die Erstellung des Gutachtens bezüglich der vBG und ZiE über den Anbieter der PV-Fassade, die Firma Damm-Solar. Das Fachbüro Contura Ingenieure führte Produkttests durch, erstellte auf dieser Basis das Gutachten und beriet die Stadt bei der Antragstellung. Megasol, der Hersteller der MorphoColor®-PV-Module und der Unterkonstruktion FAST 2 lieferte Produktinformationen, Zertifikate zum Brandschutz und Statik-Berechnungen. Informationen zur geplanten Konstruktion und Befestigung der PV-Fassade an der Energiezentrale wurden vom Planungsbüro RBS wave sowie der Ingenieur- und Gutachtergesellschaft Christian Persohn, die im Auftrag von Damm-Solar tätig war, geliefert. Sehr hilfreich war auch die Unterstützung durch den Prüfstatiker im Bauordnungsreferat der Stadt Kaiserslautern. Der Antrag auf ZiE und vBG wurde bei der zuständigen Obersten Bauaufsichtsbehörde in Rheinland-Pfalz beantragt, die beim Finanzministerium angesiedelt ist [17]. Der Prozess wurde von Fraunhofer ISE koordiniert, dessen Expert:innen nicht nur Technologien für BIPV-Fassaden entwickeln, sondern sich auch mit deren Planungs- und Genehmigungsprozessen beschäftigen [8].

Beantragt wurde bei der Obersten Bauaufsichtsbehörde eine Zulassung im Einzelfall (ZiE) für die MorphoColor®-PV-Module, ausgeführt als Glas-Glas-Module, die bislang ein nicht-geregeltes Bauprodukt sind. Weiter wurde eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) beantragt, die benötigt wurde für den Anschluss der PV-Module an die Tragstruktur durch tragende Klebungen und Backrails (Montageschienen). Die Montage der PV-Module erfolgt verdeckt über Backrails (Montageschienen), die auf der Modulrückseite parallel zu den Längsseiten der Module linienförmig mit zwei Klebfugen auf das Glas geklebt sind (siehe Abbildung 8). Das Eigengewicht der Glaselemente wird mechanisch durch Halter abgetragen. Es erfolgt kein planmäßig dauerhafter Lastabtrag über die Klebfugen [18]. Abbildung 9 zeigt einen Schnitt durch ein PV-Modul mit Backrails und Modulhaltern sowie die Lage der Backrails hinter den Modulen.



*Abbildung 9: Links: Schnitt durch das PV-Modul mit Backrail und Halterungen (links), Quelle: Megasol [19]
Rechts: Aufsicht auf ein PV-Modul mit den beiden Backrails auf der Rückseite (blau gestrichelt) sowie den Haltepunkten (oben, Mitte, unten), Quelle: Megasol [20]*

Als Grundlage für das fachliche Gutachten von Contura Ingenieure wurde durch die staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt die Prüfung der PV-Module bei hoher Temperatur und in der Feuchte durchgeführt und damit die Anforderungen an die Beständigkeit von Verbundsicherheitsglas bestätigt. Weiter wurden durch die das Ingenieurbüro Contura an den 4 mm starken teilvorgespannten (TVG) strukturierten Gläser mit und ohne keramischer MorphoColor®-Beschichtung Biegezugversuche und Bruchbildbestimmungen durchgeführt und damit die jeweiligen Anforderungen nach den einschlägigen Normen bestätigt. Die Bestätigung der ausreichenden Standsicherheit nach den gängigen technischen Baubestimmungen wurde durch Berechnungen des Statikbüro STAFEM nachgewiesen.

Aufgrund der Prüfungen und Berechnungen wurde im Gutachten die Empfehlung zur Erteilung eine ZfE und vBG ausgesprochen. Das Gutachten war im Dezember 2024 beauftragt worden und lag Ende Mai 2025 vor. Dabei waren nicht die Durchführung der Prüfungen für die relativ lange Zeitdauer verantwortlich, sondern die Bereitstellung der Proben, Aufbereitung von Unterlagen und wiederholte Statikberechnungen, die aufgrund der speziellen Einbausituation korrigiert werden mussten.

Mit dem Gutachten wurde von der Stadt Kaiserslautern Anfang Juni 2025 der Antrag auf ZfE und vBG bei der zuständigen Obersten Bauaufsichtsbehörde in Rheinland-Pfalz gestellt. Zusätzlich zum Gutachten war noch ein Nachweis zum Brandschutz und ein Herstellernachweis zu erbringen, dass der geplante PV-Modulaufbau vergleichbar ist mit dem Aufbau, für den die Nachweise vorliegen. Auf dieser Basis und dem guten Austausch mit der Behörde wurde der Antrag im Juli 2025 positiv beschieden.

Folgende **Erkenntnisse** können aus der Beantragung des vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG) und der Zulassung im Einzelfall (ZfE) gewonnen werden:

- 1) **Bei der Demonstration von innovative Bauprodukte sollte frühestmöglich das Vorliegen von notwendigen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweisen geklärt werden.** Wenn diese nicht vorhanden sind, weil das Bauprodukt neu am Markt ist, muss baldmöglichst der allgemeine Zulassungs- und Bauartgenehmigungsprozess oder die objektbezogene ZfE bzw. vBG vorbereitet und beantragt werden. Die Vorgehensweise und der entsprechende Zeit- und Kostenaufwand sollten schon in der Planung und der Ausschreibung berücksichtigt werden.

- 2) **Genehmigungsrechtliche Fragen sind komplex, weshalb entsprechende Expert:innen zur Beurteilung und Entwicklung eingebunden werden sollten.** Dabei ist die Expertise sowohl in Bezug auf die Beurteilung der Technologie und dem Einsatz möglicher Varianten als auch der notwendigen baurechtlichen Genehmigungen und der Prozesse, um eine vBG und/oder ZiE zu erhalten, erforderlich.
- 3) **Die Beantragung einer vBG bzw. ZiE bedarf einer fachlich fundierten Koordination.**
Da technologische, genehmigungsrechtliche, planerische und weitere Aspekte berücksichtigt werden müssen und die beteiligten Akteure damit meist überfordert sind, sollte eine Koordinatorin oder ein Koordinator hierfür benannt werden. Wenn die Expertise im Planungsteam nicht vorhanden ist, sollte diese Leistung extern eingekauft werden. Durch das Leuchtturmvorhaben En-Stadt:Pfaff konnte das Fraunhofer ISE seine Erfahrungen hier einbringen und dazu Kontakte zu Fachstellen (hier Contura Ingenieure) vermitteln.
- 4) **Die ZiE und vBG kann in einem überschaubaren Zeitraum beantragt und genehmigt werden.**
Allerdings ist es hierfür notwendig, dass die notwendigen Akteure eingebunden sind und kooperativ zusammenarbeiten. Kompetente Partner müssen insbesondere zur Erstellung des Gutachtens und der notwendigen Unterlagen gefunden werden.

5 Ertrags- und Verschattungsanalyse der PV-Fassade

5.1 Ziele der Einstrahlungs-, Ertrags- und Verschattungsanalysen

PV-Fassaden weisen aufgrund ihrer senkrechten Montage und der damit verbundenen ungünstigeren Ausrichtung zu Sonne generell einen geringeren Solarstromertrag auf als PV-Module, die im ertragsoptimierten Winkel zur Horizontalen von ca. 30 Grad nach Süden hin ausgerichtet sind. Um diesen Solarstromertrag nicht weiter zu reduzieren, ist darauf zu achten, dass nur Flächen zur Installation von PV-Fassaden genutzt werden, die eine möglichst geringe Verschattung durch benachbarte Gebäude, Bäume oder den Horizont aufweisen. Wie stark der Solarstromertrag durch bei den vorgesehenen PV-Flächen bei der Energiezentrale im Pfaff-Quartier durch die Verschattung reduziert wird, wird in diesem Kapitel untersucht.

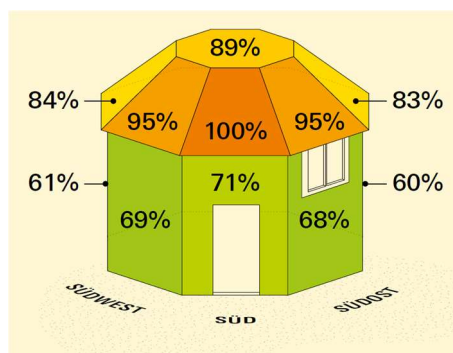


Abbildung 10: Solareinstrahlung und Solarstromertrag in Abhängigkeit von der Ausrichtung der PV-Module im Verhältnis zur optimalen Ausrichtung nach Süden mit 30 Grad Neigung für Süddeutschland, Quelle: [21]

Abbildung 10 zeigt den Einfluss der Ausrichtung und Neigung der Solarmodule auf die Solareinstrahlung und den Solarstromertrag im Verhältnis zur ertragsoptimalen Ausrichtung nach Süden mit 30 Grad Neigung für Süddeutschland ohne Verschattung. Die Installation der PV-Fassaden ist an der Südost-Fassade der Energiezentrale vorgesehen, die ca. 35° von der Südausrichtung nach Osten hin abweicht. Die Südwestfassade hat dementsprechend eine größere Abweichung von der Südausrichtung in Höhe von 55° richtung Westen. Mit der nachfolgenden Untersuchung wurde die solare Einstrahlungsmenge sowie der zu erwartende erzeugte Solarstrom berechnet. Die somit mögliche Bewertung der Einstrahlungs- und Ertragssituation stellt die Vorarbeit für die Auslegung der elektrischen Verschaltung der PV-Module dar und bildet außerdem die Grundlage für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Darüber hinaus erlaubt sie die Abschätzung der Eigenstromnutzung und kann als Benchmark für das Monitoring im späteren Betrieb dienen.

5.2 Methodik

Auf Grundlage des amtlichen Lageplans sowie von Fassadenentwürfen wurde ein für die Einstrahlungsberechnung geeignetes 3D-Modell der Energiezentrale und der Nachbarbebauung erstellt. Ausgehend von dem digitalen Gebäudemodell analysierte das Fraunhofer ISE die im Jahresverlauf zeitaufgelöste sowie in Jahressumme zu erwartende solare Einstrahlung auf die geplanten PV-Modulflächen (vgl. blaue Flächen in Abbildung 11). Die Simulationen erfolgten mit zwei verschiedenen Berechnungsprogrammen. PVGIS ist ein frei zugängliches internetbasiertes Berechnungswerkzeug der Europäischen Kommission, mit dem der Solarstromertrag von PV-Anlagen für alle Ausrichtungen und Standorte weltweit berechnet werden kann [22]. Mit PVGIS wurde zunächst die Einstrahlung ohne Verschattungseinfluss durch die umgebende Bebauung ermittelt. Hierfür reicht eine virtuelle Einstrahlungsmessstelle (Sensorpunkt) pro Fläche aus. Das Ergebnis stellt ein fiktives Maximum der Solareinstrahlungsmenge für die beiden Fassadenflächen und Ausrichtungen am Standort dar.

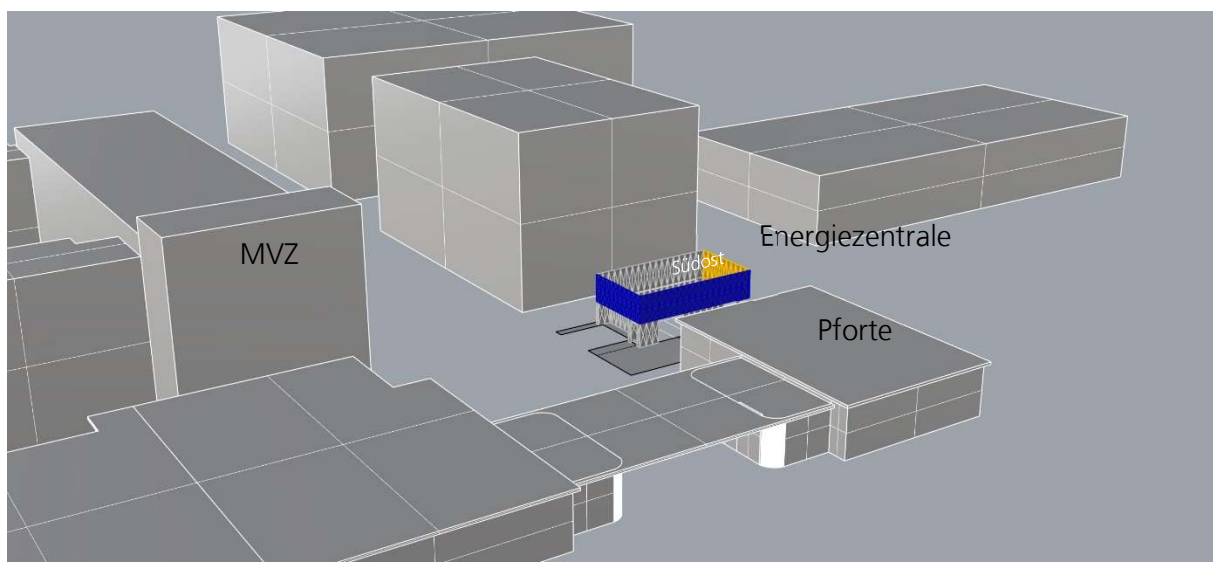


Abbildung 11: CAD-Modell der Energiezentrale im Pfaff-Quartier und der Nachbarbebauung, Quelle: Fraunhofer ISE

Mit Hilfe des Strahlverfolgungswerkzeugs RADIANCE wurde dann in einem zweiten Schritt die Einstrahlung unter Berücksichtigung der Verschattung durch die Nachbarbebauung in zeitlicher und räumlicher Auflösung für die beiden Fassaden berechnet [23]. Abbildung 12 zeigt die Anordnung der Sensorpunkte

für die Simulation auf beiden Fassadenflächen. Ungeachtet der späteren Belegung mit PV-Modulen und der daraus resultierenden Belegung der Flächen mit Solarzellen wurden die Sensorpunkte in einem festen 10 cm x 10 cm-Raster auf die gesamte Fassadenfläche verteilt. Die Differenz in den Ergebnissen von PVGIS- und RADIANCE-Berechnung dient der Bewertung des Verschattungseinflusses durch die Nachbarbebauung.

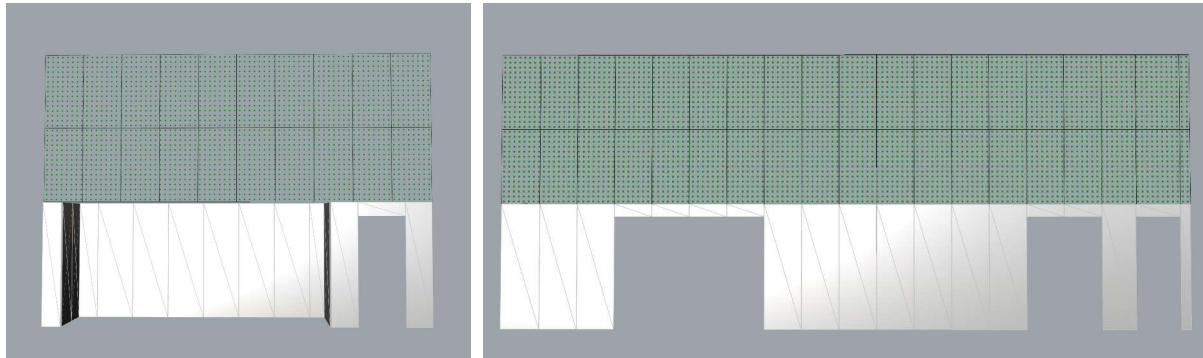


Abbildung 12: Vereinfachtes 3D-Modell der Südwest- (links) und Südostfassade (rechts) der Energiezentrale mit grünen Sensorpunkten im 10 cm x 10 cm Raster zur Strahlungsverfolgungsberechnung mit RADIANCE, Quelle: Fraunhofer ISE

Als weiterer Vergleich wurde mit PVGIS die Einstrahlung auf eine 37° geneigte und südausgerichtete Aufdachanlage simuliert. Der Verschattungseinfluss der Nachbarbebauung und/oder etwaiger Dachaufbauten wurde hierbei vernachlässigt.

Für die Einstrahlungsberechnung werden Daten über die direkte und diffuse solare Einstrahlung auf die Horizontale sowie die Außentemperatur für den Standort Kaiserslautern verwendet. Dabei wurde der Datensatz der Plattform PVGIS genutzt, der typische Jahresdaten über einen Auswertungszeitraum von 15 Jahren beinhaltet (TMY: Typical Meteorological Year; PVGIS-SARAH2 [22]). Da in einzelnen Jahren Schwankungen durch unterschiedliches Wetter vorhanden sind, stellen die Ergebnisse keine Prognose für ein konkretes Jahr, sondern den erwartbaren Mittelwert unter den gegebenen Randbedingungen dar. Aufgrund klimatischer Veränderungen ändert sich die Einstrahlung langsam, so ist die solare Einstrahlungsmenge in Deutschland zwischen 1983 und 2020 um 3,4 % pro Jahrzehnt gestiegen [24].

Folgende Szenarien wurden untersucht:

- **Szenario 1 Fassaden-BIPV:** Solarertrag unter Berücksichtigung der Verschattung durch Nachbargebäude auf beide PV-Fassaden der Energiezentrale mit herkömmlichen PV-Modulen (Frontabdeckung aus Klarglas, dunkles bis schwarzes Erscheinungsbild) (RADIANCE)
- **Szenario 2 Fassaden-BIPV:** Solarertrag ohne Berücksichtigung der Verschattung durch Nachbargebäude auf beide PV-Fassaden mit herkömmlichen PV-Modulen (PVGIS)
- **Szenario 3 Fassaden-BIPV:** Wie Szenario 1, aber mit Einsatz von innovativen farbigen MorphoColor®-PV-Modulen
- **Szenario 4 Aufdach-PV:** Vergleichsszenario mit Annahme einer Aufdachanlage auf der Energiezentrale. Keine Berücksichtigung der Verschattung durch Nachbargebäude oder Dachaufbauten, Nutzung von herkömmlichen PV-Modulen, die mit einem Neigungswinkel von 37° nach Süden ausgerichtet sind (PVGIS, Neigung und Ausrichtung „ertragsoptimiert“).

Tabelle 3 zeigt die zugrundeliegenden Annahmen in den Szenarien 1 bis 4. Bei den Fassaden wird vereinfachend angenommen, dass die PV-Modulfläche der Fassadenfläche entspricht, da die genaue Modulbelegung noch nicht feststeht.

Tabelle 3: Übersicht Berechnungsszenarien und der zugehörigen Parameterannahmen

Szenario	Verwendete Parameter
Szenario 1 Berücksichtigung der Verschattung Herkömmliche Module Berechnung mit RADIANCE	Südost-Fassade - Fassadenfläche*: ca. 41 m² - Anzahl der Sensorpunkte: 4.140 Südwest-Fassade - Fassadenfläche*: ca. 23 m² - Anzahl der Sensorpunkte: 2.340 Modulfläche gleich Fassadenfläche Modulwirkungsgrad: 18,6 %
Szenario 2 Keine Verschattung berücksichtigt Herkömmliche Module Berechnung mit PVGIS	Fassaden- und Modulflächen sowie Modulwirkungsgrad wie Szenario 1 Anzahl der Sensorpunkte: 1 pro Fassadenausrichtung
Szenario 3 Berücksichtigung der Verschattung Farbige MorphoColor®-PV-Module Berechnung mit RADIANCE	Fassaden- und Modulflächen wie Szenario 1 Modulwirkungsgrad: 17,0 % (zu berücksichtigen: der Modulwirkungsgrad der eingesetzten MorphoColor®-PV-Module liegt höher)
Szenario 4 Keine Verschattung berücksichtigt Herkömmliche Module Berechnung mittels PVGIS	Dachfläche*: 105 m ² (Erfahrungswert PV-Potenzial: Modulfläche = 40 % der Dachgrundfläche bei ertragsoptimierter Aufstellung) Modulfläche aufgeständert nach Süden ausgerichtet, ertragsoptimiert mit 37° Neigungswinkel: ca. 42 m ² Anzahl der Sensorpunkte: 1 Modulwirkungsgrad wie Szenario 1
Allgemein	Modul – Fassadenfläche: Solare Aktivierung der gesamten Fassadenfläche ohne Modul-Zwischenräume in Szenario 1-3 Solare Aktivierung der Dachfläche ohne Modul-Zwischenräume in Szenario 4 Performance Ratio der PV-Anlage: 80 % (hierin sind enthalten u.a. Schwachlichtverhalten der Module, Temperaturverluste, Verluste durch die Leistungselektronik, Leitungsverluste)

* Aus dem CAD-Modell entnommen.

5.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Einzelnen wurden folgende Größen berechnet für beide Fassadenflächen und das Dach:

- 1) Installierbare PV-Leistungen in kW_p
- 2) Jährliche solare Einstrahlungsmenge, absolut in kWh/a und flächenspezifisch in $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
- 3) Räumliche Verteilung der jährlichen Einstrahlungsmenge in $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ Auflösung zur Erkennung von räumlichen Einstrahlungsunterschieden, farbliche Darstellung in „Heat Maps“
- 4) Absolute und flächenspezifische Solarstromerträge pro Jahr auf Basis eines pauschalen Systemwirkungsgrades (Performance Ratio), d.h. ohne Berücksichtigung der konkreten elektrischen Verschaltung der Module untereinander

Abbildung 13 zeigt das Ergebnis der Einstrahlungsanalyse mit RADIANCE für Szenario 1 unter Berücksichtigung der Verschattung. Dargestellt ist für die beiden Fassadenausrichtungen die räumliche Verteilung der jährlich kumulierten Solareinstrahlungsmenge (fortan kurz: Jahreseinstrahlung) mittels Heat Maps. Ein heller Gelbton entspricht einer hohen Einstrahlungsmenge von 1.000 bis 1.100 kWh pro m^2 und Jahr, Orangetöne entsprechen mittleren Werten und der purpurne Farbton einer geringen Einstrahlungsmenge von 600 bis 700 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Die Südost-Fassade weist mit einem Mittelwert von 901 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ einen für Fassaden sehr guten Jahreseinstrahlungswert auf. Der obere Fassadenbereich ist dabei erwartungsgemäß stärker besonnt, da die Verschattung durch das flache Nachbargebäude (Pforte) gering ausfällt und keine Bäume vorhanden sind. In der unteren Modulreihe ergeben sich aufgrund der Verschattung etwas geringere Einstrahlungsmengen mit Werten von 700 bis 800 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Deshalb empfiehlt sich, die obere und die untere PV-Modulreihe möglichst in einem separaten Strang zu verschalten. Allerdings ist die Verschattung auf der Südost-Seite in der Jahreseinstrahlung sehr gering: In Szenario 1 (mit Verschattung) beträgt die Jahreseinstrahlung 901 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und ist damit nur 1 % geringer als in Szenario 2 (ohne Verschattung) mit 907 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (siehe Tabelle 4).

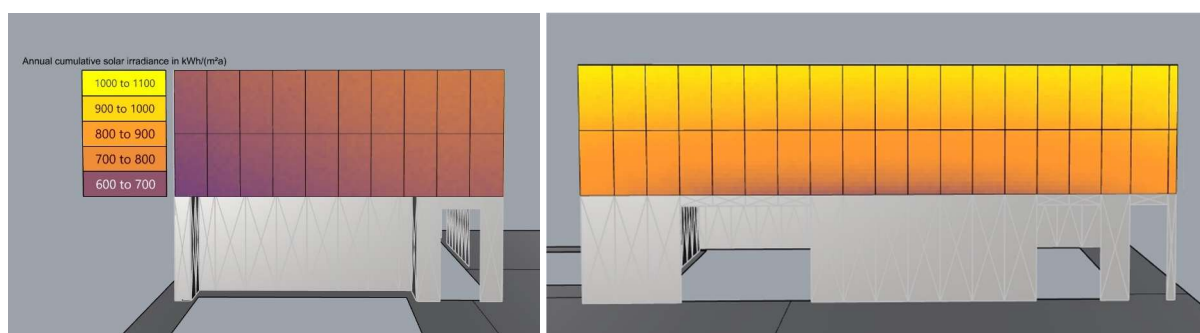


Abbildung 13: Heat Maps der Südwest (links) und der Südwest-Fassade für Szenario 1, die Farben repräsentieren die Verteilung der jährlichen solaren Einstrahlungsmenge in $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, Quelle: Fraunhofer ISE

Auf der Südwest-Fassade sind die Jahreseinstrahlungsmenge dagegen deutlich geringer mit Werten zwischen 600 und 800 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, wie Abbildung 13 auf der linken Seite zeigt. Dies liegt einerseits an der etwas ungünstigeren Ausrichtung der Südwest-Fassade, die ca. 55° von der Südrichtung in Richtung Westen abweicht gegenüber der Südostfassade, die ca. 35° von der Südrichtung in Richtung Osten

abweicht. Die ungünstigere Ausrichtung reduziert die Jahreseinstrahlung um ca. 6 % (852 gegenüber 907 kWh/(m²a), siehe Tabelle 4).

Andererseits ist die Verschattung größer aufgrund der südwestlichen Nachbarbebauung (MVZ), die deutlich höher ist als die Energiezentrale und die Pforte (siehe Abbildung 11). Auf der Heat Map ist zudem ein diagonal-verlaufender Einstrahlungsunterschied von links unten nach rechts oben zu erkennen, der bei der elektrischen Verschaltung der Module berücksichtigt werden könnte. Dass die Jahreseinstrahlungsmenge auf der Südwest-Fassade in Szenario 1 (mit Verschattung) mit 725 kWh/(m²a) 15 % unter dem Wert von 825 kWh/(m²a) in Szenario 2 (ohne Verschattung) liegt, zeigt, dass die Verschattung einen deutlich größeren Einfluss auf die Reduktion der Jahreseinstrahlung hat als die etwas ungünstigere Ausrichtung. Der Unterschied zwischen Südwest- und Südostfassade inkl. Verschattung beträgt 20 % beträgt (725 kWh/(m²a) gegenüber 901 kWh/(m²a)).

Tabelle 4 zeigt die Berechnungsergebnisse der Mittleren Jahreseinstrahlung und des resultierenden Solarstromertrags, sowie die spezifischen Größen des Stromertrags pro kW_p Leistung und pro m² Modulfläche für die verschiedenen Szenarien und Ausrichtungen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Leistungs- und Ertragsberechnungen nach Szenario und Fassadenausrichtung

Sze- nario	Orien- tierung	Modul- fläche	Installierte PV-Leistung	Mittlere Jahresein- strahlung	Solarstrom- ertrag pro Jahr	Solarstrom- ertrag pro kW _p PV-Leistung	Solarstrom- ertrag pro m² Fläche
		m²	kW _p	kWh/(m²a)	kWh/a	kWh/(kW _p a)	kWh/(m²a)
1	Südost	ca. 41	7,7	901	5.530	721	134
	Südwest	ca. 23	4,3	725	2.523	580	108
	SO + SW	ca. 64	12,0		8.053		
2	Südost	ca. 41	7,7	907	5.565	726	135
	Südwest	ca. 23	4,3	852	2.964	682	127
	SO + SW	ca. 64	12,0		8.529		
3	Südost	ca. 41	7,0	901	5.072	721	123
	Südwest	ca. 23	4,0	725	2.314	580	99
	SO + SW	ca. 64	11,0		7.386		
4	Süd	ca. 42	8,4	1.321	8.207	982	196

Der Einfluss der Verschattung und der Modulart auf den Solarstromertrag in Abhängigkeit von der Fassadenausrichtung ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Einfluss der Verschattung und der Modulart auf den Solarstromertrag

Szenario		Südost-Fassade		Südwest-Fassade	
		Solarstrom- ertrag kWh/a	Anteil	Solarstrom- ertrag kWh/a	Anteil
<i>Einfluss Verschattung</i>					
2	Ohne Verschattung	5.565	100 %	2.964	100 %
1	Mit Verschattung	5.530	99 %	2.523	85 %
<i>Einfluss Modulart</i>					
2	Herkömmliche PV-Module	5.530	100 %	2.523	100 %
3	Farbige MorphoColor®-PV-Module	5.072	92 %	2.314	92 %

Durch den Einsatz von farbigen MorphoColor®-PV-Modulen statt herkömmlichen blauen oder schwarzen Modulen reduziert sich der Solarstromertrag um ca. 8 %, unabhängig von der Ausrichtung, basierend auf den Herstellerangaben für die Module. Durch den geringeren Wirkungsgrad auf der vorgegebenen Fläche sinkt die installierbare Leistung bei Einsatz von farbigen MorphoColor®-PV-Modulen von 12,0 auf 11,0 kWp (siehe Szenario 3 in Tabelle 4).

Damit sinkt der flächenspezifische Jahresstromertrag (in kWh/m²), wobei der leistungsspezifische Jahresstromertrag (in kWh/kWp) unverändert bleibt, da der Jahresstromertrag sich proportional zur installierbaren Leistung verhält. Insgesamt resultiert in dieser Berechnung durch den Einsatz der farbigen MorphoColor®-PV-Module ein zu erwartender Jahresstromertrag von 7.386 kWh/a. Allerdings ist in der Praxis ein höherer Solarstromertrag zu erwarten, da die Wirkungsgrade der verfügbaren und eingesetzten Module zum Zeitpunkt der Installation im Jahr 2025 höher liegt als die angenommenen Modulwirkungsgrade zum Zeitpunkt der Durchführung der Berechnungen (18,6 % für herkömmliche PV-Module und 17,0 % für die farbigen MorphoColor®-PV-Module, siehe Tabelle 3). Die vergleichenden Aussagen der Berechnungen sind allerdings weiterhin korrekt, da das Verhältnis von herkömmlichen und farbigen PV-Modulen sich nicht verändert hat. Welche Wirkungsgrade sich in der Praxis ergeben, wird die Auswertung der Monitoringdaten zeigen.

Abschließend sollen die möglichen Fassadeninstallationen (Szenarien 1 - 3) mit der fiktiven Installation einer Aufdachanlage (Szenario 4) verglichen werden unter der Annahme, dass dabei die PV-Module im ertragsoptimierter Ausrichtung nach Süden in einer Neigung von 37° installiert werden und die Modulfläche 40 % der Bruttodachfläche beträgt. Die mittlere Jahreseinstrahlung auf die so ausgerichteten Module liegt ohne Verschattungseinfluss bei 1.321 kWh/(m²a), dies bedeutet, dass die Jahreseinstrahlung für eine nach Süden ausgerichtete Fassade um 29 % auf 71 %, für eine um 35° nach Südosten ausgerichtete Fassade um 31 % auf 69 % und für eine um 55° nach Südwesten ausgerichteten Fassade um 36 % auf 64 % gegenüber der optimalen Ausrichtung reduziert ist (siehe Tabelle 6).

Mit 8.207 kWh/a Solarstromertrag liegt die Dachanlage in Szenario 4 jedoch nur unwesentlich über dem Solarstromertrag von 8.053 kWh/a in Szenario 1 (gleiche Modulwirkungsgrade), obwohl der spezifische Solarstromertrag der Aufdachanlage mit 982 kWh/kW_p deutlich höher liegt als in der Südost- und der Südwest-Fassade mit 721 bzw. 580 kWh/kW_p. Dies liegt daran, dass die angenommene verfügbare Modulfläche auf dem Dach mit 42 m² deutlich geringer ist als die geeignete Modulfläche auf den Südost- und Südwestfassaden mit zusammen 64 m². Die installierbare PV-Fläche auf dem Dach kann erhöht werden, indem die Ausrichtung der PV-Modulreihen abwechselnd nach Osten und Westen erfolgt bei einer Neigung von etwa 10°, wie dies heute oft bei Flachdächern erfolgt. Doch auch hier ist zu berücksichtigen, dass die solare Jahreseinstrahlung dann 14 % geringer liegt als der Wert für die Südausrichtung (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Einfluss der Ausrichtung der PV-Module auf die solare Jahreseinstrahlung (unverschattet)

Szenario	Ausrichtung	Solare Jahreseinstrahlung kWh/(m ² a)	Anteil
4	Süden, 37° geneigt	1.321	100 %
-	Ost oder West, 10° geneigt	1.142	86 %
-	Süden, 90° geneigt (Fassade)	940	71 %
2	Südost (35° Abweichung von Süden), 90° geneigt	907	69 %
2	Südwest (55° Abweichung von Süden), 90° geneigt	852	64 %

Die Werte dieser Vergleiche sind nur beispielhaft zu sehen und hängen stark von den konkreten Bedingungen der Projekte ab. Allerdings zeigt das Beispiel gut, dass es unter ertragsorientierten Gesichtspunkten bei der Bewertung des Montageorts und damit der Ausrichtung der PV-Module nicht nur auf den spezifischen Solarstromertrag (in kWh/(m²a)) zu achten ist, sondern auch auf den absolut erzielbaren Solarstromertrag (in kWh/a). Der Vergleich verschiedener Szenarien bzw. Installationsorte kann sich diesbezüglich deutlich unterscheiden und auch PV-Fassaden mit einem deutlich geringeren spezifischen Solarstromertrag attraktiv werden. In Beispiel der Energiezentrale ist der absolute Solarstromertrag der PV-Fassadenanlagen nur unwesentlich geringer als der Ertrag einer möglichen Aufdachanlage. Allerdings sind natürlich die Kosten der PV-Fassadenanlagen höher, weil eine größere PV-Leistung installiert werden muss und die Kosten pro kWp höher sind.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass für die Südost-Fassade gute Solarstromerträge aus der geplanten PV-Fassadenanlage zu erwarten sind. Bei der Südwest-Fassade sind die spezifischen Erträge merklich geringer, sowohl aufgrund der ungünstigeren Ausrichtung als auch der höheren Verschattung. Da die Modulfläche der Südwest-Fassade jedoch kleiner ist als an der Südost-Fassade und aufgrund ihrer Ausrichtung zur Straße hin architektonisch einen wichtigen Beitrag zum Erscheinungsbild der Energiezentrale leistet, ist die Nutzung der Südwest-Fassade trotzdem sinnvoll.

6 Erkenntnisse aus der Planung und Umsetzung der PV-Fassade

Bezüglich des Planungsprozesses und der Realisierung der MorphoColor®-PV-Fassade an der Energiezentrale im Pfaff-Quartier Kaiserslautern konnten aufgrund der beschriebenen Erfahrungen folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

1) Um ein PV-Fassadenprojekt erfolgreich umzusetzen, sollten erfahrene Expert:innen eingebunden werden.

PV-Fassaden erfreuen sich zwar einer steigenden Nachfrage, doch sind sie immer noch ein Nischenthema im PV-Sektor. Daher fehlt es bei den planenden und umsetzenden Unternehmen an technologischem und ingenieurwissenschaftlichem Fachwissen zu PV-Fassaden. Die Verfügbarkeit von PV-Fasadentechnologien, deren Farb- und Designvarianten, Wirkungsgrade und andere technische Parameter sowie Montagemöglichkeiten und Integrierbarkeit in die Fassaden sind vielfach nicht bekannt. Ebenso sind die Herausforderungen und Lösungsansätze für die gewerkeübergreifende Zusammenarbeit bei Planung und Ausführung den Akteuren nur wenig bewusst. Es ist deshalb sehr wichtig, bei PV-Fassadenprojekten mit erfahrenen Unternehmen zusammenzuarbeiten oder entsprechende Expert:innen mit einzubinden. Im Vorhaben EnStadt: Pfaff unterstützte das Fraunhofer ISE die Planung und Umsetzung in allen Prozessschritten durch aktive Beratung, Wissensvermittlung und Koordinationstätigkeiten.

2) In der Planung von PV-Fassaden sollten von Beginn an alle Prozessschritte berücksichtigt werden, insbesondere bei innovativen Lösungen.

Die Umsetzung von PV-Fassaden ist ein komplexer Prozess. Neben der Optimierung der Größe und des Montageortes der Anlage, der Farbe und dem Format der Module, deren Rahmenausführung und Montagetechnik sowie der Abstimmung mit den anderen Fassadenteilen und der Gestaltung der Schnittstellen, müssen auch entsprechende statische Nachweise erbracht werden, der Brandschutz geklärt und ggf. weitere behördliche Genehmigungen beschafft werden. Bei der Zeitplanung sollten ggf. die Zeiten für die Bemusterung, den Aufwand der Ausschreibung und Vergabe und die möglicherweise langen Lieferzeiten aufgrund der kundenspezifischen Fertigung berücksichtigt werden. Bei Einsatz von innovativen Lösungen ist auch zu prüfen, ob die notwendige bauaufsichtliche Zulassung für die Bauprodukte vorliegt oder möglicherweise eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) oder Zustimmung im Einzelfall (ZiE) beantragt werden muss. Im Vorhaben EnStadt: Pfaff war beispielsweise zu Beginn des Planungsprozesses den Beteiligten nicht bekannt, dass eine ZiE und vBG für den Einsatz der innovativen MorphoColor®-PV-Module erforderlich ist. Die Schwierigkeiten bei der Ausschreibung und Vergabe der Aufträge hat in Kombination mit der Beantragung der Zulassung zu Verzögerungen von etwa 2 Jahren geführt.

3) Die Investitionsentscheidung für eine PV-Fassade sollte auf einer fundierten Planung erfolgen, die alle Funktionen und Gestaltungsmöglichkeiten der PV-Fassade berücksichtigt.

In der Planung müssen mögliche Flächen identifiziert und dabei der von der Orientierung und der Verschattung abhängige Solarstromertrag, mögliche Einschränkungen durch Blendwirkung, Wünsche und Vorgaben für die Oberflächen durch die Bauherrschaft, die Kommune oder den Denkmalschutz sowie die Integrierbarkeit in die Gesamtfassade berücksichtigt werden. Für die gestalterischen und Solarstrom-Ertragsanforderungen müssen mögliche Lösungen wie z.B. farbige, randlose PV-Module mit verdeckter Befestigung und mit hoher Effizienz,

wie sie im Pfaff-Quartier demonstriert werden, identifiziert und geplant werden. Bei der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung sollten alle Funktionen mitberücksichtigt werden, wie die hochwertige und langlebige Fassadenoberfläche, das architektonisch ansprechende Design, der höhere Selbstversorgungsgrad mit Solarstrom bei begrenzten Dachflächen und die Einsparungen bzw. Einnahmen durch die Solarstromerzeugung. So können die höheren Kosten für PV-Fassaden gegenüber konventionellen PV-Dachanlagen durch Mehrwerte in anderen Bereichen bzw. Einsparungen an anderer Stelle kompensiert und die Umsetzung auch ökonomisch attraktiv werden. In die Planung sollten erfahrende Expert:innen eingebunden sein, um alle Aspekte angemessen zu berücksichtigen.

4) Die Effizienz der PV-Fassadenmodule ist wichtig für einen guten Solarstromertrag.

Die Solarstrahlung auf eine PV-Fassade ist aufgrund des ungünstigeren Einstrahlungswinkels deutlich geringer als bei optimaler Ausrichtung auf dem Dach. Bei Einsatz von farbigen Modulen statt Standardmodulen in blau oder schwarz sinkt der Solarstromertrag zusätzlich. Um trotzdem noch einen verhältnismäßig guten Stromertrag zu erreichen, können die Zusatzverluste aufgrund der Farbigkeit durch den Einsatz von modernen Beschichtungskonzepten minimiert werden durch innovative Beschichtungen wie die MorphoColor®-Farbtechnologie, die im Pfaff-Quartier an der Energiezentrale demonstriert wird.

5) Es empfiehlt sich die Erstellung eines Farbkonzeptes mit Bemusterung, um für die PV-Fassade die am besten geeignete Farbe und Oberfläche zu finden.

Farbige PV-Module lassen sich entsprechend der Kundenwünsche in den verschiedensten Farben, Oberflächen und Formaten anfertigen und können dadurch eine Fassade architektonisch deutlich aufwerten. Weiter können unterschiedliche Montagetechniken eingesetzt werden, die mehr oder weniger sichtbar sind. Um innerhalb der Vielfalt der Möglichkeiten die beste Lösung zu finden, setzt eine sorgfältige Planung voraus, bei der die Farbe der PV-Fassadenmodule durch ein Farbkonzept optimiert und das Format und die Montageart mit den anderen Fassadenteilen abgestimmt werden. Zusätzlich sollte eine Bemusterung stattfinden, um den gewählten Farbton und die Moduloberflächen im Vorfeld auf ihre Wirkung zu prüfen. Dies berücksichtigt auch, dass produktionstechnisch möglicherweise nicht immer alle gewünschten Farben z.B. getreu nach RAL-Katalog hergestellt werden können. Im EnStadt: Pfaff Vorhaben war die Bemusterung ein wichtiger Schritt, um die Zustimmung der Denkmalschutzbehörde für die PV-Fassade zu erlangen.

6) Eine gute Zusammenarbeit der beteiligten Gewerke ist die Voraussetzung der effizienten Umsetzung von PV-Fassadenanlagen und erfordert eine aktive Koordination der Akteure.

Bei PV-Fassadenanlagen sind vor allem die Gewerke Fassadenbau, Photovoltaik und Elektrik beteiligt, wobei auch Expert:innen aus den Bereichen Architektur, Statik und Baugenehmigung sowie ggf. auch dem Denkmalschutz beteiligt sind. Dies führt dazu, dass Planung, Auslegung und Realisierung von PV-Fassadenanlagen in ihrer Komplexität eine eigenständige Expertise erfordern mit einem besonderen Augenmerk auf der Koordination der Schnittstellen zwischen den Gewerken und Akteuren. Diese kann durch die Architektin oder den Architekten erfolgen, wenn Erfahrungen mit PV-Fassaden vorliegen. Alternativ können PV-Fassaden-Expertinnen oder Experten eingebunden werden. Im EnStadt: Pfaff Vorhaben hat das Fraunhofer ISE mit seiner Erfahrung mit PV-Fassaden-Planungsprozessen das Planungsteam fachlich begleitet und bei der Koordination unterstützt.

7) Bei der Ausschreibung von kombinierten konventionellen und PV-Fassaden kann die getrennte Vergabe von Gewerken vorteilhaft sein.

Aus Sicht der Bauherrschaft erscheint es vorteilhaft, nur ein Unternehmen mit der Erstellung einer Gesamtfassade, die konventionelle Fassadenteile mit der PV-Fassade kombiniert, zu beauftragen. Denn es kann erwartet werden, dass dieses Unternehmen die Schnittstellen der Gewerke Metall- und konventioneller Fassadenbau sowie PV-Anlage intern gut koordiniert und mögliche Probleme mit der Gewährleistung an den Schnittstellen vermeiden kann, da diese aus einer Hand erfolgt. Die Erfahrung aus dem EnStadt:Pfaff Vorhaben zeigt allerdings, dass zumindest bei kleineren Bauvorhaben eine getrennte Ausschreibung und Vergabe der Gewerke nach Losen sinnvoller ist, da es schwer ist, kleinere Fassadenbauunternehmen zu finden, die auch eine ausreichende Kompetenz im Bau von PV-Anlagen aufweisen. Dies führt dazu, dass entweder keine Angebote eingehen oder diese in manchen Teilen aufgrund von Unerfahrenheit und/oder Risikoaufschlägen relativ teuer sind. Eine getrennte Vergabe nach Losen erhöht die Wahrscheinlichkeit, Unternehmen mit guter Qualifikation in ihren jeweiligen Gewerken zu finden. Die Probleme an den Schnittstellen müssen dann allerdings durch eine klare Planung und gute Koordination durch die Architektin oder den Architekten minimiert werden.

8) Die Markteinführung innovativer Technologien wie von farbigen MorphoColor®-PV-Fassaden benötigt Demonstrationsprojekte wie das Pfaff-Quartier in Kaiserslautern.

Innovative Bauprodukte oder -technologien, wie z.B. farbige PV-Fassaden, die aus den jüngsten Forschungsaktivitäten hervorgegangen sind, brauchen Zeit, bis sie vollständig marktfähig, preislich attraktiv und als rechtskonforme Bauprodukte für Bauinstallationen (z.B. auch Demonstratoren im öffentlichen Verkehrsraum) standardmäßig nutzbar sind. Forschungs- und Demonstrationsprojekte wie EnStadt:Pfaff sind sehr wichtig für eine erfolgreiche Markteinführung wie innovative PV-Fassaden, die komplex in der Umsetzung sind. Denn nur so kann im Reallabor mit den beteiligten Akteuren bei der Planung und Umsetzung der Pilotinstallation Erfahrungen mit den realen Herausforderungen in der Praxis gesammelt werden. Durch Auswertung dieser Basiserfahrungen kann ein fundiertes Fachwissen verbreitet und weitergehen der Forschungs- und Entwicklungsbedarf identifiziert und an die Wissenschaft, Hersteller und Förderinstitutionen zurückgemeldet werden.

9) Plandende und umsetzende Unternehmen sollten im Bereich der PV-Fassadentechnik geschult werden.

Die mangelnden Erfahrungen beim Einsatz von PV-Fassaden und damit dem Umgang mit den Herausforderungen der komplexen Technologie sind eine große Barriere für die weitere Verbreitung. Deshalb empfiehlt es sich, die Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung sowie die Erfahrungen aus Demonstratorprojekten wie beispielsweise EnStadt:Pfaff aufzubereiten und auf die Erkenntnisse in Schulungen für die planenden und umsetzenden Marktakteure sowie Multiplikatoren einzubringen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] WITTKOPF, Stephan ; SYNOWCZYK, Andreas: Ein Farb-Effizienz-Modell für PV-Module : Berechnungsmodelle für Farbe und Effizienz, 6/2023. In: *Bulletin Elektrosuisse*, S. 53–58
- [2] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE: *Fraunhofer ISE Forscher gewinnen Joseph-von-Fraunhofer-Preis für die MorphoColor®-Beschichtungstechnologie: Presseinformation #13*, 12. Juni 2024. URL <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2024/fraunhofer-ise-forscher-gewinnen-joseph-von-fraunhofer-preis-fuer-die-MorphoColor-beschichtungstechnologie.html> – Überprüfungsdatum 2025-06-15
- [3] MEGASOL: *SOLARCOLOR Morpho verwandelt Solarmodule in Designobjekte*. URL <https://megasol.ch/farbintensitaet-erzeugt-leistung/> – Überprüfungsdatum 2025-06-20
- [4] ASTOC MESS (Hrsg.): *Gestaltungshandbuch PFAFF : Sachstand: 17.10.2018*. 2018
- [5] MEGASOL: *RearCon-Technologie: Innovation für Solarmodule*. URL <https://megasol.ch/rearcon/> – Überprüfungsdatum 2025-06-20
- [6] BUNDESREGIERUNG: *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen* (in Kraft getr. am 2021) (2021). URL <https://www.hoi.de/hoai/volltext/hoai-2021/> – Überprüfungsdatum 2025-06-15
- [7] HEMMERLE, Claudia: *Photovoltaik in der Gebäudehülle. Wertung bautechnischer Anforderungen : Dissertation*. Dresden. 2015. URL <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-204836> – Überprüfungsdatum 2025-05-20
- [8] ENSSLEN, Frank ; MÜHLICH, Mona ; EGGERS, Jan-Bleicke ; KUHN, Tilmann ; BUENO UNZETA, Bruno ; :UNAV: *A Systematic Approach for the Integration of BIPV Planning into the Construction Planning Process*. 2024
- [9] WILSON, Helen Rose ; ENSSLEN, Frank ; MÜHLICH, Mona ; KUHN, Tilmann ; BUENO UNZETA, Bruno ; BALOG, Valentin ; :UNAV: *Ein praxisbezogener, systematischer Ansatz für die Integration der BIPV-Planung in den Bauplanungsprozess*. 2025
- [10] BIPV ALLIANZ BAUWERKINTEGRIERTE PHOTOVOLTAIK (Hrsg.): *Technische Baubestimmungen für PV-Module als Bauprodukte und zur Verwendung in Bauarten : Bauordnungsrechtliche Vorgaben zu Produkt- und Anwendungsregeln*. 2025
- [11] BIPV ALLIANZ BAUWERKINTEGRIERTE PHOTOVOLTAIK (Hrsg.): *Checkliste Brandsicherheit für Bauwerkintegrierte Photovoltaik-Anlagen (BIPV) : Bauordnungsrechtliche Vorgaben, Anwendungsregeln und Ausführungshinweise für den Planungsprozess und Bauablauf*. 2021
- [12] BIPV-INITIATIVE BADEN-WÜRTTEMBERG: *Leitfaden Bauwerkintegrierte Photovoltaik*. URL <https://bipv-bw.de/> – Überprüfungsdatum 2025-06-10

- [13] STADT KAISERSLAUTERN (Hrsg.): *Bebauungsplan Königstrape -Albert-Schweizer-Straße - Pfaffstraße Plan : "Bebauungsplan Pfaff-Quartier".* 2020
- [14] MEGASOL: *Megasol Energie AG FAST 2 Montagevideo.* URL <https://www.youtube.com/watch?v=q15MILbp83k> – Überprüfungsdatum 2025-06-20
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK DIBT: *FAQ zum deutschen Regelungssystem für Bauprodukte und Bauarten.* URL <https://www.dibt.de/de/service/faqs/das-deutsche-regelungssystem-fuer-bauprodukte-und-bauarten> – Überprüfungsdatum 2025-06-15
- [16] BAUNETZWISSEN.DE: *Zustimmung im Einzelfall und vorhabenbezogene Bauartgenehmigung : Individuelle Genehmigungen für Bauarten ohne allgemein anerkannte Regeln.* URL <https://www.bau-netzwissen.de/glas/fachwissen/nachweise-und-normen/zustimmung-im-einzelfall-und-vorhaben-bezogene-bauartgenehmigung-159386> – Überprüfungsdatum 2025-06-20
- [17] FINANZMINISTERIUM RHEINLAND-PFALZ: *Merkblatt für Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) und vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen (vBG) für das Land Rheinland-Pfalz : Stand: Januar 2023.* URL <https://fm.rlp.de/themen/bauen-und-wohnen/zustimmung-im-einzelfall> – Überprüfungsdatum 2025-06-20
- [18] CONTURA INGENIEURE GMBH (Hrsg.): *Gutachterliche Stellungnahme : Bewertung des Bauprodukts und der Bauart eines über tragende Klebfugen gelagerten PV-Moduls als Grundlage zur Erwirkung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) und einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG).* 2025
- [19] MEGASOL (Hrsg.): *FAST 2 Fassadensystem : Planungsinfos V23.01.* 2025
- [20] MEGASOL (Hrsg.): *Freigabepläne Energiezentrale Pfaff Areal : Datum: 05.03.2025.* 2025
- [21] MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): *Praxisleitfaden zur Photovoltaik-Pflicht : Ein Ratgeber für die solare Zukunft.* 2023
- [22] EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTER: *PV GIS : Photovoltaic Geographical Information System.* URL https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/de/. – Aktualisierungsdatum: 2024-12-18 – Überprüfungsdatum 2025-05-10
- [23] RADSITE: *Radiance : A Validated Lighting Simulation Tool.* URL <https://www.radiance-online.org/> – Überprüfungsdatum 2025-05-10
- [24] DEUTSCHER WETTERDIENST DWD (Hrsg.): *Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 in Deutschland.* 2023