

Licht und Schatten auf „PV in Gebäuden“: Visualisierung, Ertragsprognose, Optimierung

von Christian Reise

Überblick

Die Integration von photovoltaischen Generatoren in Gebäude erfordert oft eine besondere Bewertung der lokalen Einstrahlungsverhältnisse. In einer dicht bebauten Umgebung kann eine zeitweise Teilverschattung der Generatorflächen oft nicht vermieden werden. Eine Kombination der Simulationsprogramme RADIANCE [2] und INSEL [3] ermöglicht die architektonisch vollwertige Visualisierung und Durchführung einer präzisen (Minder-) Ertragsprognose für gebäudeintegrierte Photovoltaik auf der Basis desselben numerischen Gebäudemodells. Die detaillierte Simulation trägt dazu bei, ästhetische und technische Anforderungen an die Gebäudekonstruktion in Einklang zu bringen.

Integrating photovoltaic generators in buildings often requires a specific assessment of the local solar resource. In built-up areas, partial shading of the generator area sometimes cannot be avoided. A combination of the simulation tools RADIANCE [2] and INSEL [3] provides both a perfect visualization and an accurate estimation of shading losses, on the basis of the same numerical model of the building. Thus, simulation techniques help to meet both the aesthetical and the technical requirements of a building construction.

flächen nicht zu vermeiden. Durch die serielle Verschaltung der einzelnen Zellen eines Generators zu Strängen führen auch kleine Abschattungen (von einzelnen Zellen oder Zellenreihen) zu deutlich überproportionalen Mindererträgen.

Die Minimierung dieser Verluste erfordert eine detaillierte Untersuchung und genaue Berechnung des Anlagenverhaltens, um dann durch Variationen der Verschaltungstopologie oder der Anordnung der aktiven Flächen eine auch energetisch optimale Konfiguration zu finden. An die Stelle einer eher überschlägigen Anlagenauslegung treten damit individuelle Rechnungen, um die Auswirkungen von kleinen Änderungen in der Generatorkonfiguration präzise bewerten zu können. Wesentliche Elemente dieser Rechnungen sind:

- der Sonnenstand und die Verteilung des Diffusstrahlungsanteils, also die richtungsabhängige Leuchtdichte des Himmels,
- die Gebäudegeometrie und die Oberflächeneigenschaften der Baukörper und
- die Anordnung und Verschaltung des PV-Generators.

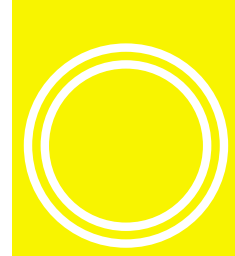
Es existiert derzeit keine Software, die alle Anforderungen dieser Rechnungen insgesamt abdeckt. Die bekannten PV-Simulationsprogramme führen keine detaillierten Verschattungsberechnungen durch; die im Bereich der Gebäudesimulation und in der Architektur gebräuchlichen Programme bieten keine oder nur rudimentäre Möglichkeiten der PV-Simulation.

Es lag daher nahe, zwei eingeführte Programmsysteme aus den verschiedenen Fachgebieten zu kombinieren, um mit wenig Aufwand zu einem umfassenden Simulationswerkzeug zu gelangen. Diese Idee – die Kopplung eines Lichtsimulationsprogramms mit einem detaillierten PV-Modell – wurde erstmals von Anne Kovach in [1] vorgestellt. Für die laufende Projektbearbeitung am Fraunhofer ISE werden jetzt die Programmsysteme RADIANCE [2] und INSEL [3] verwendet. Dabei darf nicht verschwiegen werden, daß es sich weder bei den Einzelprogram-

1. Einleitung

Die Integration von photovoltaischen (PV) Generatoren in die Gebäudehülle bringt attraktive Vorteile mit sich. Bereits vorhandene Flächen werden mehrfach genutzt, konventionelle Bauteile wie Dachziegel, Fassadenelemente, Abschattungsvorrichtungen oder Lichthofverglasungen werden durch Elemente ersetzt, die aus Sonnenlicht Strom erzeugen. Allerdings müssen oft Kompromisse eingegangen werden, was die optimale Anordnung der PV-Generatorflächen betrifft.

Benachbarte Gebäude oder Gebäudeteile, Konstruktionselemente von Dächern oder Fassaden können die gleichmäßige Beleuchtung der aktiven Flächen ebenso behindern wie Kamine oder Laternen und Fahnenmasten. Unter Umständen ist dann eine zeitweise Teilverschattung der Generator-



men noch bei dem Programmverbund um einfach benutzbare Anwendungen handelt. Die mögliche Komplexität der einzelnen Anwendungsfälle und die daher notwendige Flexibilität der Berechnungsverfahren erfordert sowohl Hintergrund-Fachwissen als auch eine deutliche Einarbeitungszeit.

2. Visualisierung: RADIANCE

Das Lichtsimulationsprogramm RADIANCE wurde an den Lawrence Berkeley Laboratories (USA) als Werkzeug für architektonische Visualisierungen im Innen- und Außenbereich entwickelt [4]. Insbesondere auf dem Gebiet der Licht- und Tageslichtplanung wird RADIANCE seit langem erfolgreich eingesetzt. Gegenüber anderen vergleichbaren Raytracing-Programmen weist RADIANCE einige besondere Eigenschaften auf. Stärken des Programms liegen z. B. in der Nachbildung der natürlichen Lichtquellen Sonne und Himmelshalbkugel und in der Verwendung physikalischer Modelle (und Einheiten) zur Berechnung von Beleuchtungs- und Bestrahlungsstärken.

Eine RADIANCE-Szene wird aus elementaren Körpern (Flächen, Quadern, Zylindern etc.) zusammengesetzt, die Oberflächeneigenschaften jedes Körpers können dabei nach Farbe, Rauigkeit und Reflektivität einzeln festgelegt werden. Verschiedene Materialklassen („Plastik“, Glas, Metall, Spiegel, etc.) stehen als Basis zur Verfügung. Über einen Makro-Mechanismus können auch komplexe Szenen mit einigen 10.000 Flächenelementen erzeugt werden. Außerdem ist die Übernahme von Gebäudedaten aus CAD-Dateien möglich.

Verschiedene Modelle der Himmelsleuchtdichte stehen zur Auswahl. Neben einem isotropen Modell sind die Standardverteilungen der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) und das Perez-Leuchtdichtemodell vorhanden. Die Güte der Nachbildung der natürlichen Beleuchtungsverhältnisse verbessert sich dabei in der genannten Reihenfolge. Auf dem Perez-Modell basieren alle hier gezeigten Beispiele und Ausführungen. Eingangsgrößen für alle Himmelsmodelle sind Werte der Global- und Diffusstrahlung auf eine horizontale Fläche,

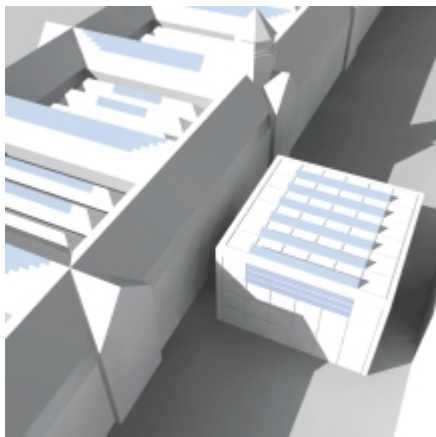
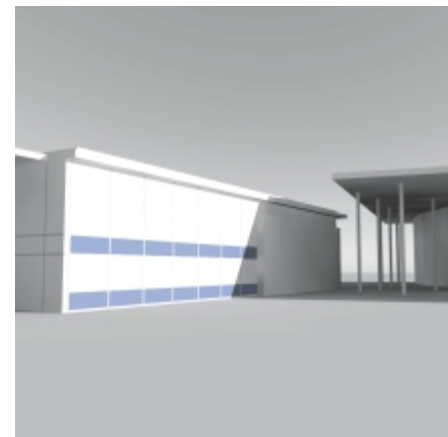


Abbildung 1: Visualisierung der Gebäude- und Einstrahlungssituation. Bei beiden Abbildungen handelt es sich um computergenerierte Darstellungen im Stil von Architekturmodellen. Der Sonnenstand entspricht dem 21. September (15:00 MEZ) bzw. dem 21. Juni (08:00 MEZ).

die geographische Lage der Szene sowie Datum und Uhrzeit.

Spezielle RADIANCE-Kommandos fügen die Szene und das Himmelsmodell zusammen und ermöglichen die Berechnung fotorealistischer Ansichten unter frei wählbaren Beleuchtungsbedingungen. [Abbildung 1](#) zeigt hierzu zwei Beispiele. Serien solcher Bilder für verschiedene Jahreszeiten erlauben die qualitative Beurteilung einzelner Flächen eines Gebäudes. Sie können damit auch zur Festlegung der Generatoranordnung genutzt werden, sofern diese noch nicht durch die Planung vorgegeben ist.

In einem zweiten Schritt werden für die ausgewählten Dach-, Fassaden- oder Freiflächen Einstrahlungsdaten für ein Raster von Testpunkten erzeugt. Dieses Raster orientiert sich an der späteren Lage der PV-Module oder der einzelnen PV-Zellen. Das Strahlungsangebot für unverschattete Flächen wird z. B. aus Test-Referenzjahren in stündlicher Auflösung vorgegeben. Im selben Zeitraster berechnet RADIANCE dann Einstrahlungswerte für die Simulation des elektrischen Generatorverhaltens, wobei alle Einstrahlungsverluste oder -gewinne durch Verschattung oder Reflektion berücksichtigt werden. Für das Raster von Testpunkten in einer gegebenen Szene werden damit Einstrahlungsfelder mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erzeugt. Diese Daten sind die Grundlage der folgenden elektrischen Simulation des PV-Generators.



3. Ertragsprognose und Optimierung: INSEL

INSEL ist ein blockschaltbildorientiertes Simulationssystem, welches auf Anwendungen im Bereich regenerativer Energieversorgungssysteme spezialisiert ist [5]. Ein Modell eines solchen Systems wird durch Verschalten verschiedener Funktionsblöcke gebildet. Über 100 fertige Blöcke mit Komponentenmodellen, Ein- und Ausgabefunktionen oder mathematischen Operationen stehen zur Verfügung, weitere Blöcke können vom Anwender erzeugt werden. Durch das sehr flexible Konzept lassen sich die verschiedensten PV-Generatorkonfigurationen nachbilden, ähnlich wie bei RADIANCE hängt die erzielbare Genauigkeit im wesentlichen vom Modellierungsaufwand und der Verfügbarkeit von Komponentenparametern ab.

Für die Ertragsbestimmung eines Generators wird das INSEL-Modell der Verschaltung mit den von RADIANCE gelieferten modul- oder zellenbezogenen Einstrahlungsdaten durchgerechnet. Diese Rechnungen werden zweimal durchgeführt, zunächst mit den Strahlungsdaten aus dem realistischen RADIANCE-Modell, dann mit Strahlungsdaten aus der Berechnung für einen unverschatteten Generator (aber gleicher Lage und Ausrichtung), die mit einem modifizierten RADIANCE-Modell berechnet wurden. [Abbildung 2](#) verdeutlicht dieses Rechenschema. Aus dem Vergleich der Ergebnisse beider Rechnungen kann der zu

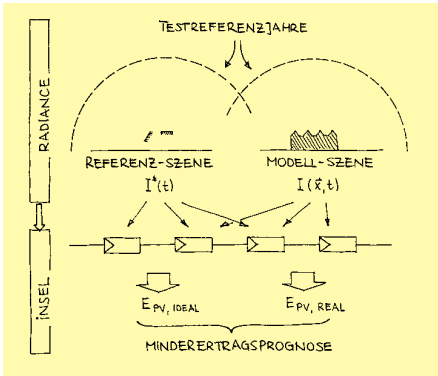


Abbildung 2: Schema der Minderertragsprognose mit RADIANCE and INSEL. Die Einstrahlungsdaten für eine ideale und die verschattete Konfiguration werden in identischen Generatormodellen verwendet; aus dem Vergleich der Ergebnisse läßt sich direkt der zu erwartende Minderertrag ableiten.

erwartende Minderertrag mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Mögliche systematische Fehler aus dem RADIANCE-Himmelsmodell, den Integrationsroutinen und dem elektrischen Modell in INSEL werden dabei weitgehend unterdrückt.

Die Optimierung eines PV-Generators erfordert nun einen iterativen Prozess aus Veränderungen der Konfiguration und/oder der Verschaltung der Generatorflächen und der Beurteilung der Resultate. Eine automatisierte Optimierung erscheint ob der Vielfalt der Variationsmöglichkeiten und der Individualität der Anwendungsfälle noch in weiter Ferne zu liegen. Wesentliche Unterstützung leisten die Programme aber durch die exakte Bewertung der unterschiedlichen Varianten.

Mit den gekoppelten Programmen können Untersuchungen in verschiedenen Größenskalen durchgeführt werden. Detailbetrachtungen für neuartige Integrationssysteme z. B. werden auf Zellen- oder Sub-Zellenbasis durchgerechnet, Ertragsprognosen für große Generatoren werden auf Modulebene durchgeführt. Die Anzahl der Einstrahlungs-Rasterpunkte wird in beiden Fällen etwa gleich groß gewählt, sie liegt je nach Situation etwa zwischen 30 und 300. So ist ein sinnvolles Verhältnis von Aufwand und Genauigkeit der Resultate gewährleistet.

4. Erfahrungen

Die Programme RADIANCE und INSEL in Kombination ermöglichen die architektonisch vollwertige Visualisierung und die Durchführung einer präzisen (Minder-) Ertragsprognose für gebäudeintegrierte Photovoltaik auf der Basis desselben numerischen Gebäudemodells. Es bestehen gewisse Anforderungen an das Fachwissen der Programm benutzer, es erscheint aber offensichtlich, daß Spezialprobleme nur mit Spezialkenntnissen zu bearbeiten sind, die (noch) nicht vollständig in Anwendersoftware abgelegt werden können.

Mit dem beschriebenen Verfahren wurden bislang etwa zehn Projekte bearbeitet. Die Problemstellungen reichten dabei von der Beurteilung geplanter Anlagen bis zur Analyse von Details der konstruktiven Ausführung gebäudeintegrierter Module. **Abbildung 3** zeigt als Beispiel die Visualisierung von Details einer Vorhangfassade, die aus einer offenliegenden Stahlstruktur und sich schuppenartig überdeckenden Glaselementen besteht. In einen Teil der Verglasung sollen PV-Zellen integriert werden. Hier half die Simulation, die ästhetischen und technischen Anforderungen an die Konstruktion in Einklang zu bringen, die notwendigen Abstände der PV-Zellen

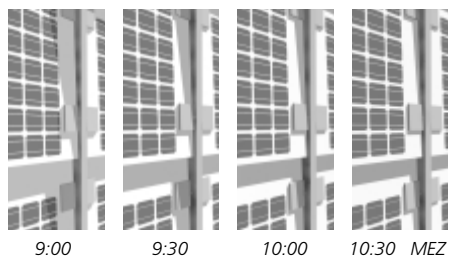


Abbildung 3: Untersuchung an Details einer geplanten PV-Fassade. Glas-Glas-Großmodule werden hier in das Gesamtkonzept der Stahl-Glas-Bauweise integriert. Da die Modulflächen jeweils hinter die Stahlkonstruktion zurücktreten, werden die Randbereiche der Laminare mit den vorgegebenen Befestigungselementen nicht belegt. Die Glasflächen sind hier hellgrau dargestellt, um den Schattenverlauf sichtbar zu machen. Gezeigt ist ein Ausschnitt aus der südorientierten Fassade für den 21. Juni für die Uhrzeiten 9:00, 9:30, 10:00 und 10:30 MEZ (von links nach rechts).

vom Rand der Module konnten nach Auswertung der RADIANCE-Darstellungen festgelegt werden. Für zwei andere Objekte, für die auch Meßdaten vorliegen, konnte eine Absicherung der Rechenergebnisse durch Vergleiche zwischen Simulation und Realität erreicht werden. In beiden Fällen wurden gut übereinstimmende Resultate erzielt.

Nicht bei allen Projekten mußten alle oben beschriebenen Rechenschritte vollständig durchlaufen werden. Als besonders überzeugend hat sich jedoch die Kombination aus Visualisierung und numerischen Ergebnissen erwiesen. Durch die bildhafte und tabellarische Präsentation sind die Resultate gerade im Umfeld der Kooperation von Architekten und Ingenieuren gut transportierbar.

Literatur

- [1] A. Kovach
„Effect of Partial Shading on the Energy Performance of Photovoltaic Arrays Integrated Onto Buildings“, Dissertation, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 6 Nr. 329, Düsseldorf (1995)
- [2] G.J. Ward
„The RADIANCE 2.4 Synthetic Imaging System“, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA (1994)
- [3] „INSEL – Integrated Simulation Environment and Language, Version 5.02b“, Renewable Energy Group, Universität Oldenburg (1997)
- [4] G.J. Ward
„Visualization“, Lighting Design and Application 20/6 (1990) 4-5, 14-20
- [5] J. Schumacher
„Neues vom Simulationssystem INSEL“, Tagungsband 9. Natl. Symp. Photovoltaische Solarenergie (OTTI), Staffelstein (1994) 371-375