

Bernhard Weller
Sebastian Horn *Hrsg.*

Denkmal und Energie 2018

Energieeffizienz, Nachhaltigkeit
und Nutzerkomfort

Denkmal und Energie 2018

Bernhard Weller · Sebastian Horn
(Hrsg.)

Denkmal und Energie 2018

Energieeffizienz, Nachhaltigkeit
und Nutzerkomfort

Herausgeber
Bernhard Weller
Technische Universität Dresden
Dresden, Deutschland

Sebastian Horn
Technische Universität Dresden
Dresden, Deutschland

ISBN 978-3-658-19671-4 ISBN 978-3-658-19672-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-19672-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die Arbeit im Gebäudebestand gehört heute zu den wesentlichen Aufgaben von Architekten, Ingenieuren und Fachunternehmen des Bauhandwerks. Eine erfolgreiche Sanierung setzt dabei ein fundiertes Fachwissen hinsichtlich der in den jeweiligen Baualterklassen verwendeten Materialien und Konstruktionsweisen voraus. Gefordert ist ein integraler Planungsprozess mit den am Bau beteiligten.

Um die von der Bundesregierung geforderten Ziele eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes bis zum Jahr 2050 zu erreichen, ist die energetische Ertüchtigung von Bestandsgebäuden unabdingbar. Diese weisen aufgrund ihrer Baukonstruktion oft sehr große Energieverbräuche auf, womit eine energetische Ertüchtigung eine bedeutende Stellschraube zum Erreichen der klimapolitischen Ziele darstellt. Baudenkmale machen zwar nur einen geringen Prozentsatz der Bestandsgebäude aus, jedoch haben Sanierungsmaßnahmen an diesen Gebäuden einen ganz besonderen Symbolcharakter. Gelingt die wirtschaftliche Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen an diesen Gebäuden, kann auch der restliche Gebäudebestand einen großen Beitrag zur Energieeinsparung leisten.

Die Vielzahl an Beiträgen in diesem Buch sowie deren Inhalte stimmen zuversichtlich, dass die energetische Sanierung von Baudenkmalen nicht nur als notwendiges Übel und im Sinne eines rein konservatorischen Ansatzes mit minimalen Aufwand betrieben wird. Vielmehr zeigt sich bei allen Akteuren die Erkenntnis, dass Baudenkmale langfristig nur erhalten werden können, wenn sie einen ausreichenden Nutzerkomfort bei gleichzeitig niedrigen Betriebskosten gewährleisten. Dieses Buch zeigt vielfältige Möglichkeiten, die Energieeffizienz und den Nutzerkomfort von Baudenkmalen unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit zu steigern.

Die Herausgeber danken den Autoren, welche mit ihren Beiträgen dem Leser einen vielfältigen Einblick in das Themenfeld der energetischen Sanierung von Baudenkmalen ermöglichen. Ein besonderer Dank gilt auch Frau Johanna Daum und Frau Isabel Ajjour am Institut für Baukonstruktion in Dresden für ihre engagierte Mitarbeit an der Drucklegung des Buches. Und ein herzliches Dankeschön an Frau Prenzer und Herrn Harms bei Springer Vieweg für die sehr gute Zusammenarbeit.

Dresden, November 2017

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Dr.-Ing. Sebastian Horn

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
----------------------	----------

Bauten und Projekte

Nutzung von Solarenergie im Campusquartier.....	1
--	----------

Dennis Thorwarth, Annina Gritzki, Maartje van Roosmalen,
Clemens Felsmann, Bernhard Weller

Solms-Hohensolmser Schloss – Energetische Sanierung, realer Verbrauch nach 5-Jähriger Nutzung ..	19
---	-----------

Ulrich Grimminger

Ökologische Stadtreparatur am Venusberg – Kombination aus Umnutzung und Niedrigenergiebauweise	29
---	-----------

Christian Peters

Umnutzung einer Friedhofskapelle	45
---	-----------

Matthias Brandner, Moritz Brümmer

Energetische und denkmalgerechte Sanierung eines Kulturdenkmals von nationaler Bedeutung	57
---	-----------

Winfried Brenne, Ulrich Nickmann

Das Pinguincafé im Dresdner Zoo – Nutzungskonzept für einen Wiederaufbau	67
---	-----------

Sebastian Horn, Jakob Klever, Maria-Magdalena Lichtblau,
Thomas Naumann, Bernhard Weller

Planung im Detail

Das Prinzip der Schwesterlichkeit – Mitversorgung von Denkmälern durch Plusenergiegebäude	79
--	-----------

Marc-Steffen Fahrion, Kurt Denzel, Werner Sobek

Dämmen oder Erhalten? Zum Umgang mit Plattenverkleidungen denkmalwerter Architektur der Moderne	93
--	-----------

Roswitha Kaiser

Baukonstruktive Problemfelder bei der energetischen Optimierung im Denkmalbestand	105
--	------------

Thomas Naumann, Benno Günther, Stefanie Kunze

Denk mal klimaneutral	119
Sabine Gabriel-Stahl	
 Vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Innendämmsysteme und deren Bewertung bei Einsatz in der Alten Schäferei Kloster Benediktbeuern	133
Martin Krus, Stefan Bichlmair, Ralf Kilian	
 Mindestwärmeschutz vs. Denkmalschutz	147
Volker Drusche	
 Villa Castelli: Sanierung mit Innendämmung auf nZEB-Standard. Nutzerüberlegungen zur Nachhaltigkeit	161
Alexandra Troj, Oscar Stuffer, Valentina Can	
 Kostenüberschreitung bei der Instandsetzung von Denkmälern: vermeiden!	177
Manfred von Bentheim	
 Material und Technik	
 Solaranlage und Baudenkmal. Zur Gestaltungsaufgabe neue Energietechnik auf alte Dächer und Fassaden	187
Roland Krippner	
 Sichere Luftdichtheit bei der Dachsanierung von außen	203
Martin Großekathöfer, Stefan Hückstädt	
 Wärmeschutz mit Kapillarrohrmatten bei hohen Industrie- gebäuden ohne Dämmung von Außenwänden und Fenstern	215
Antje Vargas	
 Feldmessungen von U-Werten zur Überprüfung der im Gebäudeenergieausweis (GEAK) hinterlegten U-Werte	225
Florian Wissmann, Holger Hendrichs, Werner Hässig	
 Holzfaserdämmung für die bauphysikalisch sichere Sanierung	241
Sabine Euler, Walter L. Meyer	

Forschung und Entwicklung

Instandsetzung von Wohngebäuden der 1980er Jahre in China 257

Hans-Peter Leimer

Erdnahe Innendämmung – Vom konservativen

Fachmonitoring zum Individualmonitoring 273

Hans Hafellner

Akustische Verfahren zur Dichtheitsprüfung 285

Nicki Bader, Peter Holstein, Karsten Eckert, Hans-Joachim Münch,
Luc Holtkamp, Theo d'Archard van Eschut

Autorenregister 297

Schlagwortregister 299

Nutzung von Solarenergie im Campusquartier

Dipl.-Ing. Dennis Thorwarth¹, Dr.-Ing. Annina Gritzki², MSc. Maartje van Roosmalen¹,

Dipl.-Ing. Sebastian Horn¹, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller¹, Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann²

1 Technische Universität Dresden, Institut für Baukonstruktion, August-Bebel-Straße 30,
D-01219 Dresden

2 Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik
und Wärmeversorgung, Helmholtzstraße 14, D-01069 Dresden

Die TU Dresden verzeichnet durch Campuserweiterungen und intensivierte Nutzung seit Jahren einen kontinuierlich ansteigenden Elektroenergieverbrauch. Im Jahr 2015 belief sich dieser auf 56 GWh [1], was nach aktuellen Angaben des BDEW [2] näherungsweise dem Stromverbrauch privater Haushalte einer Stadt mit ca. 40.000 Einwohnern entspricht. Der damit verbundene Kohlendioxid(CO₂)-Ausstoß erreichte mit ca. 25.000 t einen neuen Höchststand. Zur Erreichung der nationalen und weltweiten klimapolitischen Ziele besteht jedoch die Notwendigkeit zur Reduktion der auf die Energieversorgung von Gebäuden zurückzuführenden CO₂-Emissionen. Dabei spielt, neben Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauches, der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien eine bedeutende Rolle. Voruntersuchungen zeigen, dass auf dem Campus der TU Dresden energetisch und infrastrukturell gute Voraussetzungen für die regenerative Stromgewinnung mit Photovoltaik(PV)-Anlagen bestehen. In der Vergangenheit wurden auf dem Campus der TU Dresden mit dem Ziel der Senkung des Stromverbrauches bereits verschiedene Energieeffizienzmaßnahmen initiiert. Dazu zählen bspw. die sukzessive Umrüstung der Innen- und Außenbeleuchtung auf moderne LED-Technik sowie die Installation von PV-Anlagen auf einzelnen Gebäuden. Bezogen auf den hohen Stromverbrauch liegt der solare Deckungsgrad bisher jedoch unter 1% [1]. Zur Erreichung höherer solarer Deckungsgrade wird es perspektivisch erforderlich sein, auch die auf dem Kerngelände vorzufindenden Gebäude mit Denkmalschutz (ca. 50 % des Gebäudebestandes) für PV-Installationen zu nutzen. Hierfür bedarf es besonderen Augenmaßes und Sensibilität, um den teils widerstrebenden Aspekten des Bewahrens von Kulturgütern auf der einen Seite und der Anpassung an gegenwärtige und zukünftige Anforderungen auf der anderen Seite gerecht zu werden [3].

Im Rahmen des Forschungsprojektes CAMPER (CAMPusEnergieverbrauchsReduktion – Auf dem Weg zum Energieeffizienzcampus der TU Dresden, FKZ 03ET1319A) [4] werden Entwicklungsszenarien für die Energieversorgung des Campus der TU Dresden mit unterschiedlichem zeitlichen Horizont betrachtet, u. a. auch verschiedene PV-Ausbauszenarien. Diese werden theoretisch untersucht und aus ökonomisch-ökologischer und technischer Sicht bewertet. Damit wird eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für Abwägungen bzw. Entscheidungen hinsichtlich einer verstärkten PV-Stromerzeugung geschaffen. Innerhalb des Forschungsprojektes wird der Fokus dabei auf das Kerngelände der TU Dresden gerichtet (Bild 1-2), welches nahezu alle Gebäude des sogenannten „Hauptcampus Südvorstadt“ umfasst (ausgenommen angemietete oder für den Abriss vorgesehene Gebäude). Im Kerngelände befinden sich ca. 150 Gebäudekomplexe mit in Summe ca. 380.000 m² Nettogrundfläche. Im vorliegenden Beitrag werden erste Zwischenergebnisse der PV-Szenarienbetrachtungen für einen Teilbereich des Kerngeländes präsentiert und Lösungsansätze für denkmalverträgliche PV-Installationen aufgezeigt.

Schlagwörter: Erneuerbare Energien, Photovoltaik, Quartier, Campus, Hochschule, Denkmal, CO₂

1 Ausgangslage

Ca. 90 % der mit der gesamten Energieversorgung des Hauptcampus verbundenen CO₂-Emissionen sind auf den Verbrauch elektrischen Stromes zurückzuführen [5]. Während beim Wärmeverbrauch trotz Nutzflächenzunahme eine Konsolidierung erreicht werden konnte, stieg der Stromverbrauch in den letzten 10 Jahren kontinuierlich mit jährlichen Steigerungsraten von durchschnittlich über 5 % an (Bild 1-1). Als Hauptgründe hierfür sind v. a. Zuwächse bei Rechenkapazitäten und Laborflächen in Neubauten der Natur- und Ingenieurwissenschaften zu nennen, neben der generell gestiegenen technischen Ausstattung aller Institutsgebäude. Dabei wird die Elektroenergie überwiegend für technologische Prozesse in Laboren und Versuchshallen, den damit verbundenen Kältebedarf, den Einsatz von Rechentechnik sowie Belüftung und Beleuchtung von Gebäuden benötigt.

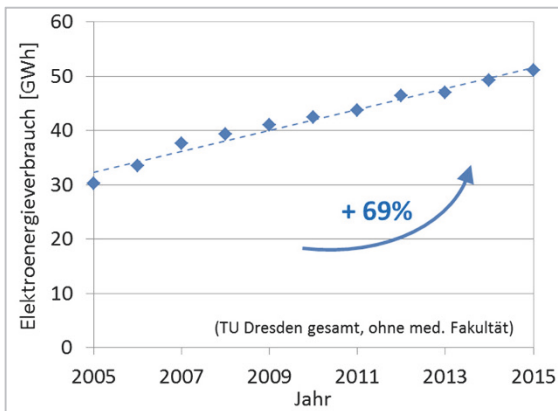


Bild 1-1 Entwicklung des Elektroenergieverbrauchs der TU Dresden.

Voruntersuchungen zum Einsatz von Photovoltaik in Gebäuden der TU Dresden [6] zeigen, dass die verstärkte Nutzung regenerativ erzeugten Stromes einen signifikanten Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen leisten kann. Als vorteilhaft erweist sich, dass die Mehrzahl der Gebäude auf dem Hauptcampus über Dachflächen mit einem guten bis sehr guten solaren Nutzungspotential verfügt (Bild 1-2). Auch muss ein Großteil der Bestandsgebäude aufgrund des schlechten baulichen Zustandes in den kommenden Jahren ohnehin umfassend saniert werden. Eine frühzeitige Einbeziehung der PV-Anlagenplanung in Sanierungsmaßnahmen kann die Realisierung in baulicher und wirtschaftlicher Hinsicht oftmals begünstigen. Parallel dazu bietet das vom öffentlichen Stromnetz unabhängige, campusinterne Verteilnetz weitreichende Möglichkeiten zur Realisierung eines hohen Eigenverbrauchs des selbsterzeugten Solarstromes.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei ca. der Hälfte der Gebäude auf dem Hauptcampus der TU Dresden jedoch um Baudenkmale. Die Nachrüstung von PV-Anlagen bedeutet

zumeist eine sichtbare Änderung des Erscheinungsbildes der Gebäude bzw. Dachlandschaften und gerät damit ins Spannungsfeld von Klima- und Denkmalschutz. Eine Hauptaufgabe liegt daher in der Erarbeitung akzeptanzfähiger Lösungen für die Integration von Photovoltaik in Baudenkmale, die sowohl denkmalpflegerischen als auch konstruktiven und ökonomisch-ökologischen Aspekten gerecht werden. Dass dies gelingen kann, zeigen die vielerorts in Sachsen und ganz Deutschland auf denkmalgeschützten Gebäuden realisierten Anlagen. Im Folgenden sollen zunächst einige vorhandene PV-Installationen auf Baudenkmalen in Sachsen vorgestellt und anschließend die Potentiale und Herausforderungen eines stärkeren PV-Einsatzes auf dem Hauptcampus der TU Dresden diskutiert werden.

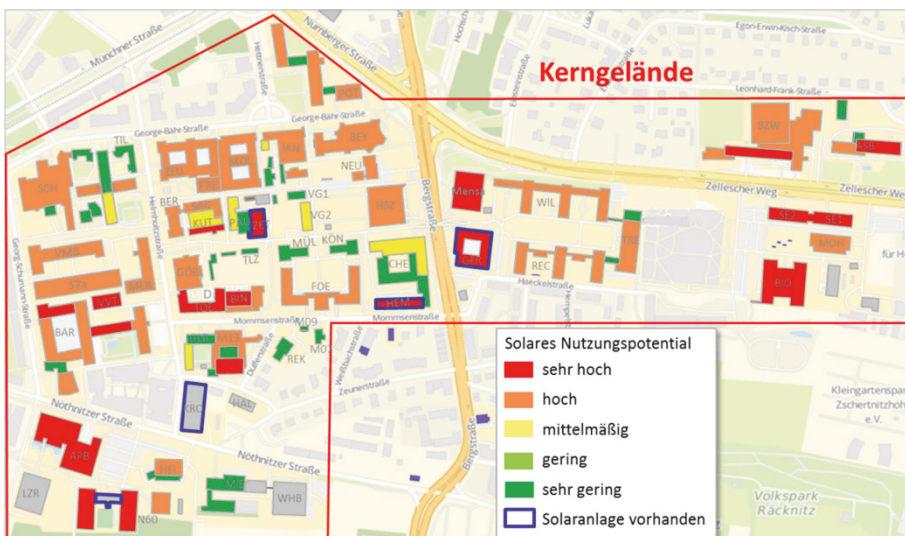


Bild 1-2 Solares Nutzungspotential der Dachflächen auf dem Hauptcampus der TU Dresden nach [6].

2 Solaranlage auf Denkmälern

2.1 Praxisbeispiele in Dresden und Umgebung

Durch die Einführung des Stromeinspeisungsgesetzes (StromEinspG) und das darauffolgende Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) kam es insbesondere in den Jahren 2005 bis 2012 zu einem erheblichen Zuwachs an PV-Anlagen in Deutschland [7]. Zusätzlich befördert wurde diese Entwicklung durch private oder gemeinnützige Initiativen, wie die der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Diese hatte bereits 1998 im Rahmen der Förderinitiative „300 Kirchengemeinden für die Sonnenenergie“ vermehrt die Installation von

Demonstrationsanlagen zur Solarenergienutzung auf denkmalgeschützten Kirchen unterstützt. Bis zum Jahr 2000 wurden in Sachsen bereits an die 50 Solaranlagen auf kirchlichen Gebäuden errichtet. Nachfolgend werden einige Praxisbeispiele aus Dresden und Umgebung vorgestellt.

Ev.-Luth. Kirche in Dresden-Löbtau

Im Rahmen einer 2006 durchgeführten Sanierung wurde auf dem denkmalgeschützten Kirchengebäude der Ev.-Luth. Kirche in Dresden-Löbtau eine dachintegrierte PV-Anlage errichtet (Bild 2-1 links). Unter Berücksichtigung der vorhandenen Fledermausgauben wurde eine firstnahe Modulreihe montiert [8].



Bild 2-1 Ev.-Luth. Kirche [9] (links) und Pfarrkirche St. Antonius [10] in Dresden Löbtau.

Pfarrkirche St. Antonius in Dresden-Löbtau

Die unter Denkmalschutz stehende Hallenkirche St. Antonius der Katholischen Pfarrei in Dresden-Löbtau wurde 1924 errichtet. Im Zuge einer Komplettisanierung wurde unter Beachtung des Denkmalschutzes in den nach Süden gerichteten Teil des Satteldachs aus Naturschiefer eine PV-Anlage integriert (Bild 2-1 rechts). Das erste Konzept einer gesamten Dachbelegung wurde durch die zuständige Denkmalschutzbehörde abgelehnt. 2001 war dies die erste Solaranlage auf einem Baudenkmal in Dresden und erhielt den Preis „Solarenergie in der Architektur“ der Lokalen Agenda 21 [9].

Neben kirchlichen Bauten gibt es zahlreiche weitere denkmalgeschützte private oder öffentliche Gebäude mit PV-Anlage (z.B. Museen, Schulen, Universitätsgebäude), wie nachfolgend am Beispiel der denkmalgeschützten Grundschule Altenberg dargestellt wird. Die Praxis zeigt, dass bei Denkmälern mit geeigneten Dachflächen häufig dachintegrierte Lösungen bevorzugt werden. Bei Flachdächern wird i.d.R. eine aufgeständerte Unterkonstruktion gewählt.

Grundschule Altenberg (Erzgebirge)

Auf der denkmalgeschützten Grundschule Altenberg im Osterzgebirge wurde auf Initiative von 43 Bürger/innen sowie der Stadt Altenberg mit Unterstützung durch den Freistaat Sachsen im Jahr 2009 eine Aufdachanlage realisiert. Von der zur Straße gerichteten Südseite des schiefergedeckten Satteldachs wurden 135m² mit PV belegt [10] (Bild 2-2).



Bild 2-2 Grundschule Altenberg (Erzgebirge) (Foto: Christian Gebhardt).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Einbindung von Photovoltaik auch bei denkmalgeschützten Gebäuden grundsätzlich möglich, aber oftmals mit Hindernissen verbunden ist. Bisher existiert keine allgemeingültige Rechtslage, weshalb die Entscheidung für oder gegen eine PV-Anlage immer eine Einzelfallentscheidung darstellt. Weiterhin zeigen die Erfahrungen früherer Umsetzungen, dass sich eine frühzeitige, kooperative Einbindung der verantwortlichen Behörden positiv auf den Entscheidungsprozess auswirkt und sich geeignete Lösungen finden lassen. Neuartige Entwicklungen der PV-Branche ermöglichen überdies heute Lösungen, die vor einigen Jahren noch undenkbar waren. Im Folgenden wird beispielhaft ein innovativer Lösungsansatz vorgestellt, der in Deutschland bereits auf denkmalgeschützten Gebäuden zur Anwendung kam.

2.2 Innovatives PV-Indachsystem (nD-System)

Bei der Integration von Photovoltaik in Bestandsgebäude, insbesondere solche mit Denkmalschutz, ist es oftmals von Vorteil, wenn sich die Technik möglichst unauffällig in die umgebende Dachlandschaft einfügt. Daher wird für die im Anschluss eingehender betrachteten denkmalgeschützten Campusgebäude ein PV-Indachsystem mit farblich angepasster, homogener Optik vorgeschlagen. Bei dem System sind die PV-Module in ein

Trägersystem eingebettet und werden, ähnlich zu herkömmlichen Dachziegeln, mit Überdeckung montiert (Schnellmontagekonzept). Auf diese Weise entsteht eine wetterfeste, diffusionsoffene und stabile Dachhaut. Ein patentiertes Hinterlüftungskonzept soll laut Hersteller für eine ausreichende Wärmeabfuhr auf der Rückseite sorgen und dadurch einen hohen Modulwirkungsgrad gewährleisten (Bild 2-3) [16]. Im Bereich von Fenstern, Dachaufbauten, Verschattungen sowie den Dachkanten können optisch gleichwertige Blindmodule eingesetzt werden.

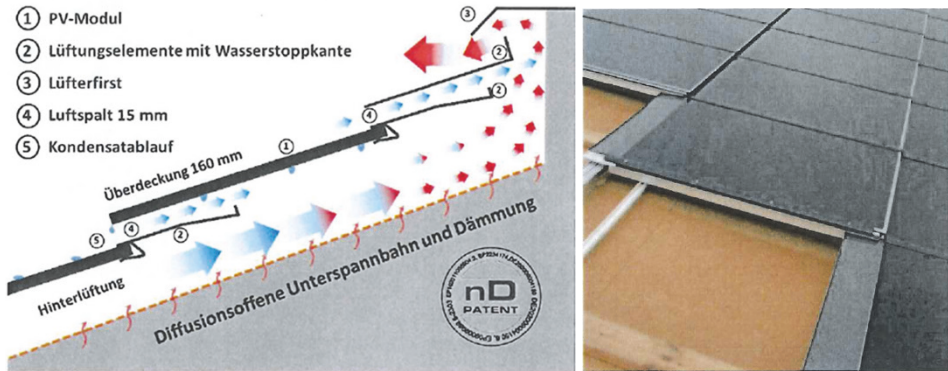


Bild 2-3 nD-System der Fa. Blue energy systems GmbH [16].



Bild 2-4 Beispielhafte Indachlösung für den Willers-Bau (Visualisierung)

Der technologische Fortschritt in der PV-Branche ermöglicht es inzwischen, Moduleigenschaften gezielt zu beeinflussen. Je nach Wahl von Material, Abmessung und Farbpalette können bspw. schwarze PV-Module in einer matten Ausführung hergestellt werden, die optisch einer Schiefereindeckung sehr nahe kommt. Bild 2-4 visualisiert die vorgeschlagene Indach-Lösung für ein denkmalgeschütztes Campusgebäude mit Schiefereindeckung (Willers-Bau). Aufgrund der großen baulichen Ähnlichkeit des Gebäudes zu den benachbarten Bauten könnte dies eine durchgängige Lösung für das gesamte Carré darstellen.

Neben gestalterischen Aspekten sind bei der Integration von Photovoltaik in Bestandsgebäude weitere Fragestellungen zu berücksichtigen. Dazu gehört die Prüfung der Tragfähigkeit der Dachflächen und bei Bedarf der Möglichkeiten zur statischen Ertüchtigung ebenso wie der vorbeugende Brandschutz. Bei Baudenkmalen wiegen durch Brandschäden verursachte Verluste besonders schwer, weshalb die Thematik bereits im Vorfeld der Planungen unter Einbeziehung der zuständigen Feuerwehren eingehend zu behandeln ist. Ob eine großflächige Dachbelegung mit Photovoltaik erhöhte Risiken hervorruft und wie diesen ggf. begegnet werden kann, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch umstritten.

Im Folgenden werden die energetischen Potentiale einer verstärkten PV-Stromerzeugung für einen ausgewählten Campusbereich quantifiziert und den auftretenden Elektroenergieverbräuchen sowohl kumuliert als auch im zeitlichen Verlauf gegenübergestellt.

3 Untersuchungsmethodik

Der im vorliegenden Beitrag betrachtete Teilbereich des Hauptcampus umfasst vier Institutsgebäude unterschiedlicher Fachrichtungen, von denen drei Denkmalstatus besitzen. Die vier Gebäude, Gerber-Bau (GER), Willers-Bau (WIL), Trefftz-Bau (TRE), Recknagel-Bau (REC) (Bild 3-1), sind über eine Niederspannungsverteilung miteinander verbunden und Teil eines größeren Mittelspannungsringes „Ost“ (Bild 3-2). Dies ermöglicht die bedarfsabhängige Verteilung solar erzeugten Stromes zwischen den Gebäuden (auf Nieder- oder Mittelspannungsebene). Insgesamt gibt es im Bereich des Hauptcampus sieben interne Mittelspannungsringe, über die nahezu alle Gebäude versorgt werden.



Bild 3-1 Betrachtete Campusgebäude GER, WILL, TRE, REC (v.l.n.r.).

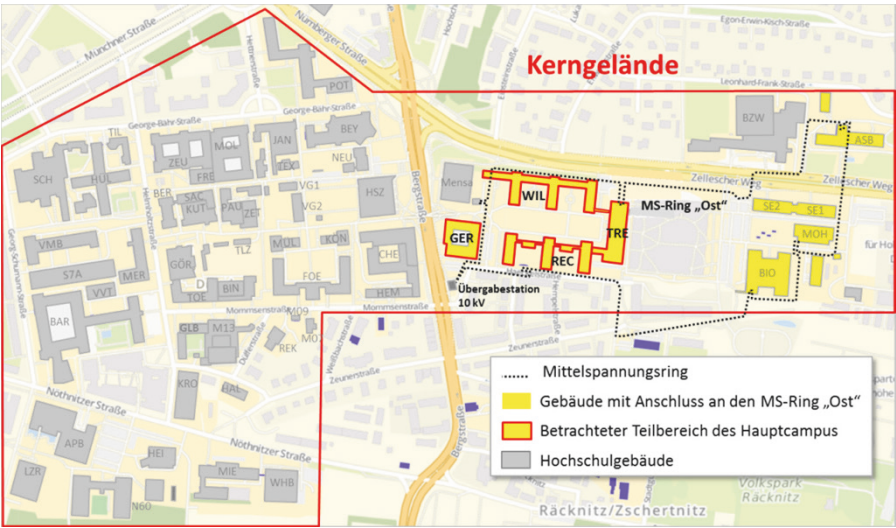


Bild 3-2 Hauptcampus mit dem betrachteten Teilbereich GER-WIL-TRE-REC.

Auf dem Flachdach des nicht denkmalgeschützten Gerber-Baus wurde anlässlich des Evangelischen Kirchtags in Dresden 2011 eine PV-Anlage mit einer Anlagenleistung von 45 kWp installiert. Später wurde eine weitere PV-Anlage ähnlicher Bauart mit einer Leistung von 50 kWp nachgerüstet. Damit ist das Dach des Gerber-Baus (Bild 3-3) nahezu vollständig mit aufgeständerten PV-Modulen einer Gesamtleistung von 95 kWp belegt.

Weitere PV-Anlagen existieren im betrachteten Campusbereich gegenwärtig nicht. Dieser Ist-Zustand wird mit einem fiktiven PV-Ausbauszenario verglichen. Es ergeben sich die folgenden zwei Varianten:

Tabelle 3-1 Übersicht der gewählten Wände und der Anzahl Messungen.

Variante MIN (Ist-Zustand)	Variante MAX (theoret. Ausbauszenario)
Keine PV-Anlagen auf Denkmälern, somit kein weiterer PV-Ausbau	PV-Belegung aller verfügbaren, größeren zusammenhängenden Dachflächen mit hoher solarer Einstrahlung
PV-Anlagen nur auf dem Gerber-Bau	Keine Einschränkung für Denkmäler

Die Minimalvariante (Variante MIN) repräsentiert den gegenwärtigen Ist-Zustand mit vorhandener PV-Anlage auf dem einzigen nicht denkmalgeschützten Gebäude. Die weitestmögliche Belegung der Dachflächen nicht denkmalgeschützter Gebäude ist auf dem

Campus heute nicht die Regel. Insofern stellt der Gerber-Bau hinsichtlich seiner PV-Ausstattung ein Vorzeigebjekt dar und dessen Ist-Zustand (Variante MIN) könnte für eine Reihe weiterer (nicht denkmalgeschützter) Campusgebäude beispielgebend sein.

Im maximalen Ausbauszenario (Variante MAX) wird von dem fiktiven Fall ausgegangen, dass sich aus dem Denkmalschutz oder Bauzustand der Gebäude keinerlei Beschränkungen bzgl. der Installation von PV-Anlagen ergeben und alle größeren zusammenhängenden Dachflächen (mit hoher solarer Einstrahlung) belegt werden können. Dies entspricht zum heutigen Zeitpunkt einer unrealistischen Annahme, ist aber dazu geeignet, das theoretisch erreichbare Maximum an solaren Stromerträgen zu ermitteln (wenn man von Fassadeninstallationen absieht). Dabei werden alle Dachausrichtungen einbezogen, für welche bei heutigen Preisen die Wirtschaftlichkeit einer PV-Installation i. d. R. gegeben ist (siehe auch Abschnitt 4.3). Das umfasst sämtliche Dachflächen mit Süd-, Ost- oder West-Orientierung sowie Flachdächer, ausgenommen verschattete Dachbereiche und solche mit Aufbauten, Gauben oder Fenstern. Vertikale (Fassaden-) Flächen werden nicht betrachtet, da auf diese im Jahresverlauf ca. 30% weniger Solarstrahlung trifft als auf geneigte (Dach-) Flächen gleicher Orientierung [6].

Die Variante MAX soll dazu dienen, vorhandene Potentiale zur regenerativen Energiegewinnung aufzuzeigen und die mit zunehmender Integration erneuerbarer Energien auftretenden Fragestellungen zu diskutieren. Insgesamt könnte auf den Dachflächen des betrachteten Gebäudeensembles unter optimalen Bedingungen Photovoltaik mit einer elektrischen Spitzenleistung von ca. 1,1 MWp installiert werden. Dies entspricht einem Zubau um mehr als das Zehnfache der heute installierten Leistung. Die Dachflächen der denkmalgeschützten Gebäude (WIL, TRE, REC) würden dabei zu 50...80 % mit PV-Modulen belegt. Bild 3-3 zeigt ein Luftbild des betrachteten Campusbereiches mit Visualisierung der in Variante MAX angenommenen PV-Installationen. Zur Hervorhebung sind die PV-Module hier stark blau eingefärbt. In der Realität wählt man bei Baudenkmalern optisch eher unauffällige Module.

Zur Bestimmung der PV-Stromertragsprognosen wird auf den Wetterdatensatz des Deutschen Wetterdienstes für die Referenzperiode 1981-2010 am Standort Dresden zurückgegriffen. Die darin enthaltenen Strahlungsdaten entsprechen langjährigen Durchschnittswerten. Dadurch wird sichergestellt, dass die Ertragsprognosen eine gute Übereinstimmung zum durchschnittlichen Ertrag während der gesamten Nutzungsdauer zeigen und nicht durch Verwendung der Wetterdaten eines strahlungsreicheren oder strahlungsärmeren Jahres über- oder unterbewertet werden. Demgegenüber kann bei der Betrachtung der Stromverbraucher leider nicht auf mehrjährige Messwerte zurückgegriffen werden. Wegen der seit 2014 stattfindenden sukzessiven Umrüstung der Gebäudeleittechnik stehen dem Forschungsvorhaben als Stromverbrauchsdaten lediglich die gemessenen Stundenwerte eines früheren Jahres (2013) vollständig zur Verfügung.

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen besteht in der Gegenüberstellung der sich für die verschiedenen Varianten ergebenden Stromertrags- und Verbrauchslastprofile sowie in

der Ableitung der theoretisch erreichbaren solaren Deckungsgrade, Eigenverbrauchsanteile, Autarkiegrade und CO₂-Einsparungen. Der solare Deckungsgrad beschreibt, welcher Anteil des Strombedarfes bilanziell (d. h. unter Vernachlässigung der zeitlichen Übereinstimmung von PV-Stromangebot und Stromnachfrage) durch die PV-Stromerzeugung gedeckt werden kann. Praktisch kann in Zeiten mit hoher PV-Stromerzeugung und gleichzeitig geringerer Nachfrage jedoch nur ein Teil des Solarstromes selbst verbraucht werden. Das Verhältnis des selbst verbrauchten zum insgesamt erzeugten Solarstrom bezeichnet man als Eigenverbrauchsquote. Der Autarkiegrad beschreibt dagegen, inwieweit ein Gebäude unabhängig vom öffentlichen Stromnetz versorgt werden kann. Dies entspricht dem Verhältnis des selbst verbrauchten PV-Stromes zum Gesamtstromverbrauch.

Neben der energetischen Betrachtung soll auch eine erste Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines weiteren PV-Ausbaus erfolgen.

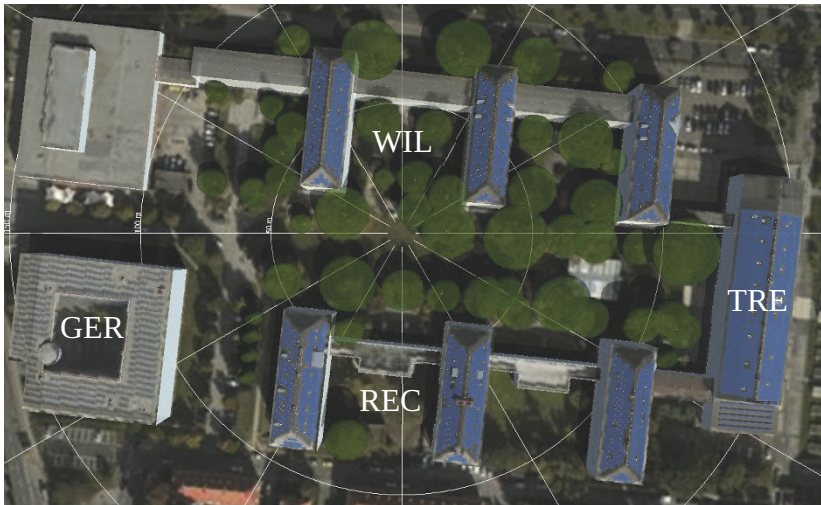


Bild 3-3 Visualisierung des betrachteten Campusbereiches mit möglichen PV-Installationen.

4 Untersuchungsergebnisse

4.1 Regenerative Eigenstromversorgung und CO₂-Minderungspotential

Die solaren Stromerträge der PV-Anlagen in den verschiedenen Varianten werden mit Hilfe der Software PV*SOL der Fa. Valentin [11] ermittelt. Es handelt sich hierbei um ein dynamisches Simulationsprogramm, bei dem auch der Einfluss von Verschattungen durch umliegende Bebauung oder Vegetation berücksichtigt werden kann. Vorliegend

wird dies durch die Einbeziehung umstehender Gebäude und größerer Bäume in die Modellierung realisiert [12]. Die vorhandene PV-Anlage auf dem Gerber-Bau wird ebenfalls modelliert, um gegenüber den fiktiven PV-Anlagen vergleichbare solare Stromerträge für den in der Simulation verwendeten Wetterdatensatz zu erhalten. Zudem liegen die real gemessenen Energiegewinne nur als Monatswerte vor und eignen sich damit nicht für eine Lastganganalyse.

Die jährliche PV-Stromproduktion durch die Anlagen auf dem Gerber-Bau entspricht der so bezeichneten Variante MIN (Ist-Zustand). Mit dem hierbei gewonnenen Solarstrom kann ca. 6 % des Strombedarfes des betrachteten Gebäudeensembles (GER-WIL-TRE-REC) gedeckt werden. In der betrachteten maximalen Ausbaustufe (Variante MAX) werden zusätzlich die drei denkmalgeschützten Gebäude (WIL, TRE, REC) mit PV-Anlagen heutigen technischen Standards ausgerüstet. Für diese können Stromerträge von insgesamt 800 MWh/a prognostiziert werden, was zusammen mit den auf dem Gerber-Bau vorhandenen PV-Anlagen Stromerträgen von ca. 900 MWh/a entspricht. Bilanziell könnte damit ca. 55 % des Strombedarfes gedeckt werden. Die nachfolgende Lastganganalyse soll zeigen, inwieweit der Solarstrom von den Institutsgebäuden tatsächlich zur Eigenbedarfsdeckung verwendet werden könnte.

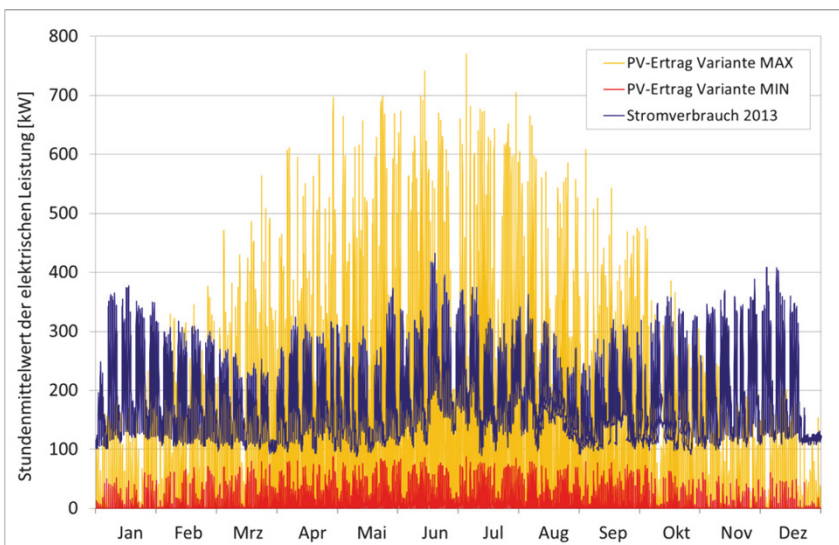


Bild 4-1 Jahresgang des gemessenen Stromverbrauchs (2013) und der simulierten PV-Erträge (ohne Degradation) in den verschiedenen Varianten.

Die Lastganganalyse erfolgt durch Gegenüberstellung der zeitlichen Verläufe von PV-Stromangebot und Verbrauchernachfrage mit stündlicher Auflösung. In [15] wurde nachgewiesen, dass bei einer Zeitschrittweite von 1 h hinreichend genaue Vorhersagen zur

Eigenverbrauchsquote solar erzeugten Stromes und zum Autarkiegrad getroffen werden können. Bild 4-1 zeigt den Jahresgang der solaren Stromerträge (ohne Degradationseinfluss) und der verbrauchsgebundenen Lasten (im Jahr 2013) in den verschiedenen Varianten mit stündlicher Auflösung. Es wird deutlich, dass in der gegenwärtigen Ausbaustufe (Variante MIN) der Strombedarf der Institutsgebäude zu jeder Stunde des Jahres größer als die PV-Stromerzeugung ist. Somit resultiert eine Eigenverbrauchsquote für den PV-Strom von 100 %. Der Autarkiegrad, welcher ein Maß für die Unabhängigkeit von der öffentlichen Stromversorgung darstellt, entspricht dabei der Höhe des solaren Deckungsgrades (6 %). Das heißt, ca. 94 % des jährlichen Strombedarfes müssen gegenwärtig aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden.

In der angenommenen maximalen Ausbaustufe (Variante MAX) ergäben sich dagegen in der Übergangszeit und im Sommer zahlreiche Betriebsstunden mit Solarstromgewinnen, welche signifikant über den Stundenmittelwerten der elektrischen Last der Verbraucher liegen. Dadurch würde hier die jährliche Eigenverbrauchsquote für den PV-Strom auf ca. 67 % sinken, sofern keine Maßnahmen zur Anpassung des Stromverbrauches an das PV-Stromangebot ergriffen werden. Der Autarkiegrad würde 37 % erreichen. Das bedeutet, auch bei größtmöglichem PV-Ausbau müsste das Gebäudeensemble noch ca. 63% des jährlichen Strombedarfes aus dem öffentlichen Stromnetz beziehen. In Zeiten mit Stromüberschuss könnte eine Einspeisung in das öffentliche Netz erfolgen, was aus wirtschaftlicher Sicht aufgrund der im Vergleich zum Strombezugspreis deutlich geringen Einspeisevergütungen jedoch nachteilig ist. Durch den Einsatz von Batteriespeichern oder eine angebotsabhängige Steuerung von Verbrauchern könnte die Eigenverbrauchsquote erhöht und der anteilige Strombezug aus dem öffentlichen Netz auf minimal 45 % verringert werden.

Weiterführende Untersuchungen im Rahmen einer Studienarbeit [13] zum Forschungsprojekt CAMPER gehen u.a. der Frage nach, inwieweit bei Vergrößerung des Bilanzraumes auf den gesamten Mittelspannungsring „Ost“ bzw. die zugehörigen Gebäude (vgl. Bild 3-2) unter Berücksichtigung der dort erzielbaren PV-Stromgewinne auch ohne zusätzliche Maßnahmen eine hohe Eigenverbrauchsquote erreicht werden könnte und wie sich die Situation in den übrigen campusinternen Mittelspannungsverteilnetzen gestaltet. Aufgrund der spezifischen Besonderheiten der verschiedenen Institutsgebäude muss jeder Mittelspannungsring für sich betrachtet werden.

Für den Klimaschutz ist letztlich nicht die Einsparung von Energie, sondern die von Treibhausgasen entscheidend. Daher wird im Folgenden betrachtet, inwieweit die PV-Stromgewinnung zur Minderung der auf die gesamte Energieversorgung der Campusgebäude (mit Fernwärme und Strom) zurückzuführenden CO₂-Emissionen beitragen kann. Dabei werden die von den Energieversorgern zuletzt angegebenen spezifischen CO₂-Emissionen verwendet [1] (el. Strom: 451 g/kWh; FW: 44 g/kWh). Aus dem Vergleich der unterschiedlichen spezifischen Emissionswerte der Energieträger Strom und Fernwärme lässt sich schließen, dass der von der TU Dresden aus dem öffentlichen Netz be-

zogene elektrische Strom im Vergleich zur Fernwärme im Stadtgebiet Dresden je Kilowattstunde ca. das Zehnfache an CO₂-Emissionen verursacht. Mithin wirkt sich jede eingesparte bzw. selbst erzeugte Kilowattstunde Strom besonders emissionsmindernd aus. Für den nicht selbst verbrauchten PV-Strom wird vereinfachend angenommen, dass er zu ähnlich hohen CO₂-Einsparungen führt, da Überschüsse ins öffentliche Stromnetz eingespeist und an anderer Stelle verbraucht werden können.

Tabelle 4-1 fasst die Berechnungsergebnisse der verschiedenen betrachteten Varianten zusammen und dokumentiert das CO₂-Reduktionspotential. Wie vermutet, wirkt sich die regenerative Stromgewinnung aus Sicht des Klimaschutzes sehr vorteilhaft aus. Mit dem gegenwärtigen PV-Ausbaugrad (Variante MIN) werden ca. 5 % der auf die Endenergieversorgung (Strom und Fernwärme) zurückzuführenden CO₂-Emissionen eingespart. Im angenommenen maximalen PV-Ausbauszenario (Variante MAX) könnten die Emissionen sogar um ca. 46 % gesenkt werden. Dabei ist zu betonen, dass es sich um einen theoretischen Fall handelt, der dazu dienen soll, die ökologisch-ökonomischen Möglichkeiten aufzuzeigen. Im nächsten Schritt wird die Wirtschaftlichkeit eines weiteren PV-Ausbaus (Variante MAX) auf dem Campus untersucht.

Tabelle 4-1 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse.

PV-Variante	MIN	MAX
Jährlicher PV-Stromertrag in MWh/a	99	899
CO ₂ -Reduktion in t/a	43	405
Solarer Deckungsgrad (Strom)	6 %	55 %
Eigenverbrauchsquote (Strom)	100 %	67 %
Autarkiegrad (Strom)	6 %	37 %
Jährlicher Stromverbrauch in MWh/a	1.640	
Jährlicher FW-Verbrauch in MWh/a	3.018	
CO ₂ -Emissionen durch FW-Verbrauch in t/a	134	
CO ₂ -Emissionen durch Strom-Verbrauch in t/a	739	
Relative CO ₂ -Einsparung durch PV (bzgl. Gesamtenergie für Strom + FW)	5 %	46 %

4.2 Wirtschaftlichkeit

Die nachfolgende dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung wird ausschließlich für die in Variante MAX zu errichtenden Anlagen durchgeführt, da die in Variante MIN (Ist-Zustand) vorhandenen Anlagen unter anderen Rahmenbedingungen realisiert wurden (höhere PV-Installationspreise und höhere Einspeisevergütungen). Den Berechnungen nach der Kapitalwertmethode werden folgende Randbedingungen zugrundegelegt:

$$C(t) = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Mit:

- $C(t)$: Kapitalwert [€]
- I_0 : Investitionskosten [€]
- T : Nutzungsdauer (20 a)
- E_t : Jährliche Einnahmen bzw. Verbrauchskosteneinsparungen [€/a]
- A_t : Jährliche Ausgaben [€/a]
- i : Kalkulationszinssatz (4 %)
- t : Betrachtungsjahr

$$A_t = b \cdot I_0 \cdot (1 + s_b)^t \quad (2)$$

Mit:

- A_t : Jährliche Ausgaben [€/a]
- b : Jährliche Betriebskosten (1,5 %/a der Investitionskosten)
- s_b : Betriebskostensteigerung (4 %/a)

$$E_t = \underbrace{W_t \cdot \{q \cdot p \cdot (1 + s_p)^t\}}_{\text{Vermiedene Ausgaben durch Eigenverbrauch von PV-Strom}} + (1 - q) \cdot v \quad (3)$$

Mit:

Vermiedene Ausgaben durch Eigenverbrauch von PV-Strom

- E_t : Jährliche Einnahmen bzw. Verbrauchskosteneinsparungen [€/a]
- W_t : Jährlicher PV-Stromertrag inkl. Ertragsrückgang durch Degradation (-2,5 % im 1. Jahr, anschließend kontinuierlich -0,7 %/Jahr)
- q : Eigenverbrauchsquote (70...100 %)
- p : Strombezugspreis (20 ct/kWh)
- s_p : Strompreissteigerung (4 %/a)
- v : konstante Einspeisevergütung (11 ct/kWh)

Die Investitionskosten I_0 für PV-Anlagen variieren v. a. in Abhängigkeit der Anlagengröße und Einbausituation. Vorliegend werden in Anlehnung an den „German PV ModulePriceMonitor© 2016“ [17] folgende Systempreise zugrundegelegt:

Kristalline Module, aufgeständert oder dachparallel: 10...100 kWp: 1.250 €/kWp
100...1000 kWp: 1.050 €/kWp

Indach-System (nD-System [16]) mit kristallinen Modulen: 100...1000 kWp: 230 €/m²
(mittlerer flächenspez. Preis bei vollständiger Dachbelegung mit PV- und Blindmodulen)

Die optisch anspruchsvollere Indach-Lösung führt näherungsweise zu einer Verdoppelung der Investitionskosten. Bei einer ohnehin erforderlichen Dacherneuerung ist eine gewisse Kostenreduktion zu erwarten, da dann auf die Neueindeckung mit Dachziegeln verzichtet werden kann. Der jährliche PV-Stromertrag W_t verringert sich durch Degradation bei kristallinen Solarzellen bis zum Ende der Nutzungsdauer auf ca. 85 % des Anfangswertes (Herstellergarantie). Bei guter Planung und Wartung der Anlagen können diese länger als 20 Jahre genutzt werden. Ein entsprechender Restwert wird hier jedoch nicht berücksichtigt, was zu einer eher vorsichtigen Wirtschaftlichkeitsbewertung führt. Die den berechneten Verbrauchskosteneinsparungen zugrundegelegte jährliche Strompreissteigerung von 4 %/a liegt etwas unterhalb aktueller Angaben des Statistischen Bundesamtes [15] (für Großkunden im Zeitraum 2008-2015 durchschnittlich +4,7 %/a) und auch unterhalb der realen Strompreisentwicklung für die TU Dresden in den letzten Jahren (2005-2015 durchschnittlich +5,4 %/a). Auch dies führt zu einer eher vorsichtigen monetären Bewertung.

Mit der jüngsten Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2017) im Juli 2017 wird für PV-Anlagen mit einer installierten Leistung größer 100 kW die Direktvermarktung des gewonnenen Stromes an der Strombörse vorgeschrieben. Allerdings bestehen für Anlagen mit einer installierten Leistung kleiner 750 kW Ausnahmeregelungen. Bei der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird nach wie vor von einer konstanten Einspeisevergütung ausgegangen.

Bild 4-2 zeigt im oberen Bereich die ermittelte Kapitalwertentwicklung im Verlauf der Nutzungsdauer bei konventioneller Installation monokristalliner Module. Die Anfangsinvestition würde ca. 1,1 Mio. Euro betragen. Bei vollständigem Eigenverbrauch des gewonnenen Stromes (Optimum) würde sich der PV-Ausbau (Variante MAX) nach ca. 7 Jahren amortisieren. Bis zum Ende der Nutzungsdauer könnte ein Gewinn von ca. 2,7 Mio. Euro erwirtschaftet werden. Verringert sich der Eigenverbrauchsanteil auf 70%, erhöht sich die Amortisationszeit aufgrund der im Verhältnis geringeren Netzeinspeiserlöse auf ca. 10 Jahre und der Gewinn halbiert sich auf ca. 1,4 Mio. Euro. Wählt man aus gestalterischen Gründen für Schrägdächer eine Indach-Lösung, verdoppelt sich die Anfangsinvestition auf nahezu 2 Mio. Euro und amortisiert sich bei vollständigem Eigenverbrauch des Solarstromes nach ca. 13 Jahren. Bei nur 70 %igem Eigenverbrauch amortisiert sich die Indach-Lösung erst kurz vor dem Ende der Nutzungsdauer (Bild 4-2).

Fazit: Konventionelle PV-Installationen stellen sich nicht nur energetisch, sondern auch wirtschaftlich vorteilhaft dar. Die optisch anspruchsvollere Speziallösung (nD-System) kann bei sehr hohem Eigenverbrauch ebenfalls gewinnbringend eingesetzt werden und

bei einer Eigenverbrauchsquote im Bereich von 70% zumindest kostenneutral realisiert werden. Im Zusammenhang mit einer ohnehin erforderlichen Dacherneuerung lässt sich trotz der erhöhten Investitionskosten auch bei niedrigerem Eigenverbrauch ein Gewinn erwirtschaften.

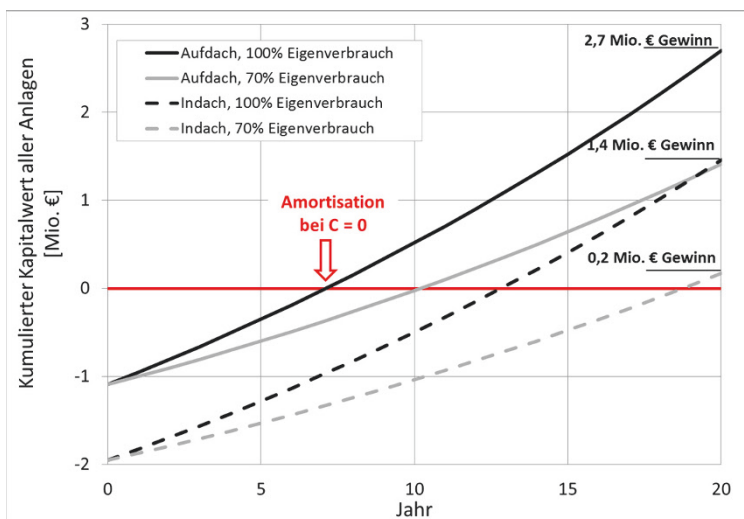


Bild 4-2 Kapitalwertentwicklung im maximalen Ausbauszenario (Variante MAX).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für den Hauptcampus der TU Dresden lässt sich feststellen, dass bei einem konsequenten Ausbau der PV-Stromgewinnung erhebliche CO₂-Emissionsreduktionen erreicht werden können. Im vorliegenden Beispiel ließen sich unter optimalen Bedingungen für den betrachteten Campusausschnitt theoretisch bis zu 46 % der auf die gesamte Endenergieversorgung mit Strom und Fernwärme zurückzuführenden CO₂-Ausstöße vermeiden. Inwieweit sich dies unter den gegebenen Denkmalschutzanforderungen so realisieren lässt, bleibt zu prüfen.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist grundsätzlich ein möglichst hoher Eigenverbrauch solar gewonnenen Stromes anzustreben. Bei einer Eigenverbrauchsquote im Bereich von 70...100%, die für den Campus realistisch erscheint, ergeben sich bei konventioneller Installation Amortisationszeiten im Bereich von 7...10 Jahren. Auch optisch anspruchsvollere Speziallösungen für Baudenkmale sind bei hohem Eigenverbrauch wirtschaftlich vorteilhaft. Bei öffentlichen Gebäuden kann die Wirtschaftlichkeit durch Einbeziehung von Fördermitteln (z. B. des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung – EFRE) zusätzlich verbessert werden.

Zahlreiche ausgeführte Solaranlagen auf Baudenkmalen in Deutschland zeigen, dass Denkmalschutz und erneuerbare Energien vereinbar sind. Allerdings ist hierbei besonderes Augenmerk auf gestalterische Aspekte zu legen, um eine Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes zu vermeiden. So sollte eine PV-Anlage hinsichtlich Kubatur, Flächenausdehnung, Farbigkeit und Oberflächenbeschaffenheit gut den Gegebenheiten angepasst werden. Neuere Entwicklungen bieten diesbezüglich weitreichende Möglichkeiten, sind allerdings häufig mit erheblichen Mehrkosten verbunden. Darüber hinaus sind technische Fragestellungen zu lösen, wie bspw. der Umgang mit zusätzlichen Dachlasten, die Leitungsführung, der Brandschutz oder die Gestaltung konstruktiver Anschlüsse. Oftmals sind dem Bauherrn die besonderen Anforderungen eines Denkmals nicht geläufig. Umso wichtiger ist die frühzeitige, kooperative Einbindung der Denkmalschutzbehörden in Bauvorhaben, um geeignete Lösungen zu erarbeiten und Verzögerungen im Projektablauf zu vermeiden. Allgemeingültige Regeln, welche zu einer positiven Entscheidung für Solaranlagen auf oder an Denkmalen und deren Umgebungsschutzbereich führen, können nicht formuliert werden. Es handelt sich stets um Einzelfallentscheidungen.

6 Danksagung

Die Erstellung des Beitrages wurde durch Studierende der TU Dresden unterstützt. Besonderer Dank gilt den Studierenden Maria-Magdalena Lichtblau und Daniel Kröger für die Bereitstellung von Berechnungsergebnissen. Dem Dezernat 4 der TU Dresden und dem Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement (SIB) danken die Autoren für die Kooperation im Forschungsprojekt, die anregenden fachlichen Diskussionen sowie die Bereitstellung von Gebäudedaten und Verbrauchsinformationen.

7 Literatur

- [1] Umweltbericht der TU Dresden 2016, TU Dresden, Januar 2017.
- [2] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Energie-Info - Stromverbrauch im Haushalt. BDEW, Berlin, 2016.
- [3] Thorwarth, D.; van Roosmalen, M.: Betrachtung von Baudenkmalen in der Quartiersebene. In: Weller, B.; Horn, S. (Hrsg.): Denkmal und Energie 2017 – Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016.
- [4] Forschungsprojekt CAMPER – CampusEnergieverbrauchsReduktion: Auf dem Weg zum Energieeffizienz-Campus der TU Dresden. Im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung, Förderschwerpunkt EnEff:Stadt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) - FKZ 03ET1319A.
- [5] Forschungsprojekt CAMPER: Beitrag zum Newsletter Arbeits-, Umwelt- und Gesundheitsschutz 01/2017, TU Dresden, April 2017.

- [6] Weller, B.; Hemmerle, C.: Entwicklungskonzept - Einsatz von Photovoltaik in Gebäuden der TU Dresden. Dresden, Institut für Baukonstruktion, 2012.
- [7] Vaaßen, W.; Schmidt, H. u.a.: Leitfaden - Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaik-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung. Köln, TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, 2015.
- [8] www.buergerkraftwerk.de – Stand: 22.06.2017.
- [9] Ingenieurbüro Dr. Scheffler & Partner GmbH: www.ib-scheffler.de – Stand: 10.08.2017.
- [10] Papsch, D., Energietisch Altenberg e.V.: Bürgersolaranlagen auf kommunalen Dächern. Beitrag zur 3. Jahrestagung Kommunalen Energie-Dialog Sachsen, Dresden, November 2010.
- [11] www.valentin-software.com – Stand: 04.07.2017
- [12] Lichtblau, M.-M.: Einsatz von erneuerbaren Energien (Photovoltaik) für ein Gebäudequartier. Dresden, Diplomarbeit, Institut für Baukonstruktion, 2017.
- [13] Kröger, D.: Lastganganalysen zu PV-Ausbauszenarien für den Campus der TU Dresden. Dresden, Studienarbeit, Institut für Energietechnik, 2017.
- [14] Prapatsornpittaya, A.: Eigenverbrauch von Photovoltaikstrom – Stunden oder Minutenwerte?, Dresden, Studienarbeit, Institut für Energietechnik, 2014.
- [15] Statistisches Bundesamt: Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis Juli 2016. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, August 2016.
- [16] blue energy systems GmbH: www.nd-system.de – Stand: 10.08.2017.
- [17] EuPD Research Sustainable Management GmbH: Photovoltaik-Preismonitor Deutschland. German PV ModulePriceMonitor© 2016. Ergebnisse 1. Quartal. Im Auftrag des Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar), EX0091-059-2-3-01-1.

Solms-Hohensolmser Schloss – Energetische Sanierung, realer Verbrauch nach 5-Jähriger Nutzung

Prof. Dipl.-Ing. Ulrich Grimminger^{1,2}

1 Hochschule für angewandte Wissenschaften Fachhochschule Rosenheim, Fakultät für Holztechnik und Bau, Hochschulstraße 1, D-83024 Rosenheim

2 konbau GmbH – Ingenieurbüro für Konstruktion und Bauteilprüfung, Schloßstraße 25, D-35510 Butzbach

Um das Jahr 1479 ließen die Grafen von Solms-Lich einen älteren, an der Stadtmauer von Butzbach gelegenen Fruchtspeicher zu einem repräsentativen Schloss ausbauen. Das Solms-Hohensolmser Schloss diente fortan als Amtshaus und Witwensitz. Von 1879 bis 2004 wurde das Gebäude als Amtsgericht von Butzbach im Wetteraukreis, Hessen genutzt, danach stand es einige Jahre leer, bevor eine neue Nutzung gefunden wurde. Über drei Jahre dauerten die Revitalisierungsarbeiten des Schlosses. Inzwischen wurde das Projekt abgeschlossen und das historische Bauwerk seiner Bestimmung als Kultur- und Lebenszentrum übergeben. Für die aufwendige Sanierung wurde das Bauwerk 2015 mit dem hessischen Holzbaupreis und 2017 mit dem hessischen Denkmalschutzpreis ausgezeichnet. Über die Erfahrungen nach 5-jähriger Nutzungszeit eines Kulturdenkmales von nationaler Bedeutung aus dem Jahre 1479 wird im Folgenden berichtet.

Schlagwörter: Solms-Hohensolmser Schloss, Kulturdenkmal, Energetische Sanierung, Denkmalpflege, Klimastabilisierung, Gewölbekeller

1 Einführung

Das im 15. Jahrhundert erbaute Schloss (Bild 1-1) der Grafen von Solms blickt auf eine wechselhafte Geschichte zurück. Zunächst als Fruchtspeicher erbaut, wurde es in Folge als Witwen- und Verwaltungssitz der Eigentümerfamilie genutzt. Nach einer umfangreichen Renovierung 1876-79 zog das Amtsgericht Butzbach ein, wo es bis 2004 beheimatet war. In diesen knapp 130 Jahren als Verwaltungssitz waren an dem Gebäude ausschließlich partielle Reparaturarbeiten durchgeführt worden. Gleichzeitig büßte es zunehmend an Substanz und Stabilität ein: Feuchtigkeit und Pilzbefall schädigten sowohl das Mauerwerk als auch die Dachkonstruktion erheblich. Ein Wasserrohrbruch während des fünfjährigen Leerstands bis zum Beginn der Instandsetzung verschlimmerte die Situation zusätzlich, sodass eine umfangreiche Revitalisierung unerlässlich war. Die Sanierung sollte unter Berücksichtigung strenger Vorgaben der Denkmalpflege erfolgen, da das Schloss inzwischen vom Kulturstaaatsminister zum Denkmal nationaler Bedeutung erhoben worden war. Im Jahr 2011 begann der neue Eigentümer, die Entwicklungsgesellschaft Solmser Hof, unter Prof. Ulrich Grimminger mit einer Sanierung, die 2014 abgeschlossen werden konnte. Dabei wurden die Ende des 19. Jahrhunderts vorgenommenen Um- und Einbauten soweit wie möglich zurückgebaut. Originale Ausstattungsstücke und Bauteile

wie das beeindruckende Renaissance-Treppenhaus (1588), das durch einen Wasserschaden schwer beschädigt worden war, wurden restauriert (Bild 1-2). Die stark verwitterten, steinsichtigen Fassaden wurden saniert, alte Sandsteingewände wieder freigelegt. Besonderes Augenmerk galt dem imposanten gotischen Dachstuhl, der sich über drei Ebenen erstreckt.



Bild 1-1 Das Solms-Hohensolmser Schloss wurde vom Kulturminister als Denkmal von nationaler Bedeutung eingestuft (Foto: © konbau GmbH).



Bild 1-2 Der schlichte Renaissancebau verfügt über ein repräsentatives Treppenhaus (Foto: © konbau GmbH).

2 Instandsetzung

2.1 Renaissancebau mit eindrucksvollem Innenausbau

Das Solms-Hohensolmscher Schloss setzt sich aus einem zweigeschossigen Rechteckbau und einem viergeschossigen Rundturm zusammen. Die Rückseite des Gebäudes ist an die Stadtmauer angelehnt. Äußerlich erscheint der Renaissancebau recht schlicht, innen ist er aber aufwendig gestaltet. So verfügt das Schloss über ein repräsentatives Treppenhaus und einen gotischen Dachstuhl (Bild 2-1), der sich über drei Ebenen erstreckt. Die Sanierung des Dachstuhls bildete neben Mauerwerk und Fassade einen Schwerpunkt der Revitalisierungsarbeiten.



Bild 2-1 Das Solms-Hohensolmscher Schloss verfügt über einen dreigeschossigen, gotischen Dachstuhl mit 200 Dachbalken (Foto: © Eifert Holzbau GmbH).

2.2 Morsche Balken behutsam saniert

Auf einer Fläche von 600 Quadratmetern stellen 200 Deckenbalken und Sparren eine gewaltige Konstruktion dar, deren Zustand hauptsächlich im Traufbereich wegen jahrzehntelanger Feuchtigkeitseinwirkung in Mitleidenschaft gezogen worden war. Von den bestehenden Balken mussten schließlich 190 Stück an den Kopfenden ausgebessert werden, da sie teilweise morsch und instabil waren (Bild 2-2). Damit die historische Bausubstanz weitgehend erhalten und unberührt bleiben konnte, entschied sich Planer und Projektleiter Prof. Ulrich Grimminger von der konbau GmbH für die klassische Balkenkopfisanierung mittels Überblattung (Bild 2-3). Die schadhaften Stellen wurden ausgeklinkt und mit passgenauen Balkenstücken aus intaktem, altem Bauholz ersetzt. Letzteres, um den historischen Charakter des Dachstuhls beizubehalten. Die stehenden Blätter an Bestands- und Austauschbalken wurden mit Doppelgewindeschrauben verschraubt und mit einer Verstöpselung gegen unzulässigen Wärmeeintrag im Brandfall geschützt. Durch die Verstöpselung mit einem Querholzblättchen wurde zudem der Einfluss der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten von Stahl und Holz minimiert. Der

Vorteil der Doppelgewindeschrauben liegt darin, dass sie mit ihrem Zusammenzieheffekt eine bessere Reibungsübertragung vom neuen Anschlussteil auf den Bestandsbalken gewährleistet und mögliche Schwindfugen durch Aufbringen einer Vorspannung reduzieren. Da die Doppelgewindeschraube über zwei Gewinde unterschiedlicher Steigung verfügt, zieht sie bei der Verschraubung das neue Anschlussteil an den Balken heran und bildet gleichzeitig eine sichere und kraftschlüssige Verbindung. Die Doppelgewindeschraube kann sowohl als Verbindungsmittel zwischen Holzbauteilen, als auch zur Ertüchtigung von stark belasteten Hölzern im Bestand eingesetzt werden. Mit ihrem speziellen Gewinde eignet sie sich zur Übertragung hoher Zug- und Druckkräfte. Weiterhin kann die Schraube zur Stabilisierung bestehender Risse in den alten Konstruktionshölzern eingesetzt werden. Hierfür wurden die Schrauben im 90°-Winkel zu den Rissen in Deckenbalken und Sparren eingeschraubt und so die weitere Ausdehnung dieser Risse verhindert. Weil sich der liegende Dachstuhl über drei Geschosse erstreckt und das Dach sehr steil ist, war die Verstärkung der Sparrenfußpunkte notwendig. Zu diesem Zweck wurde jeder Sparren am Balkenaufleger mit einer Knagge versehen, um eine zusätzliche Schublastübertragung im Inneren zu erzielen (Bild 2-4). Eine Durchdringung des beheizten Volumens mit metallischen Verbindungsmittel und die damit einhergehende Gefahr des Tauwasserausfalles konnte damit konsequent vermieden werden.



Bild 2-2 Feuchtigkeit und Pilzbefall haben dem historischen Gebälk vor allem im Traufbereich stark zugesetzt (Foto: © Eifert Holzbau GmbH).