

# Das Dach der Zukunft

## Hoher Photovoltaik-Ertrag versus geringe Heiz- und Baukosten

von Leo Cremer, Christoph Drebes und Christine Weber

Es macht für den Solarertrag einen Unterschied, mit welcher Dachform ein Neubau gestaltet wird. Werden Heiz- und Baukosten mitbetrachtet, ist das Flachdach gegenüber dem klassischen Satteldach oft im Vorteil.

So stellen sich Planende regelmäßig folgende Fragen:

- Wie sollten Dächer mit PV-Belegung gestaltet sein, wenn Energie- und Kostenaspekte berücksichtigt werden?
- Ist ein Flachdach, ein Pultdach oder ein Satteldach insgesamt betrachtet die beste Wahl?

Beim klimafreundlichen Bauen und Modernisieren spielen solaraktive Systeme wie PV-Module auf dem Dach eine wichtige Rolle als Energieerzeuger. Gebäude mit regenerativer Energieversorgung benötigen diese Energie vor allem zum Heizen und zur Warmwasserbereitung. Als Teil der Gebäudehülle trägt das Dach aber auch wesentlich zum Wärmebedarf eines Gebäudes bei. Nicht zuletzt hängen auch die Baukosten von der Dachform ab.

### Ertrag

Der Ertrag pro m<sup>2</sup> PV-Modul und Jahr hat in mitteleuropäischen Breiten in Südausrichtung bei ca. 30° Neigung sein Maximum. Werden die Module auf einem Flachdach hintereinander aufgeständert angeordnet, müssen sie entsprechend auf Abstand aufgestellt werden, um sich nicht gegenseitig zu verschatten. Die verbaute solaraktive Panel-Fläche sinkt daher mit höherer Neigung. Beim Pult- und Satteldach gibt es diesen Effekt nicht, da die PV-Module übereinander angeordnet werden.

### Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf eines Gebäudes hängt zum Großteil von der Kompaktheit und der energetischen Qualität der Gebäudehülle ab. Ein Flachdach bedeutet hinsichtlich der Kompaktheit den vorteilhaftesten Gebäudeabschluss nach oben. Die Neigung der PV-Module hat wegen einer separaten Aufständerung dabei keinen Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Beim Pult- und Satteldach hat eine höhere Dachneigung nicht nur eine größere Dachfläche zur Folge. Zusätzlich vergrößert sich auch die Außenwandfläche, entweder im Bereich des Giebels (Satteldach) oder am Ortgang bzw. First (Pultdach).

### Baukosten

Die Baukosten werden vor allem von der Dachfläche und der Dachform beeinflusst. Die Kosten der PV-Anlage hängen direkt (über die Modulanzahl) und indirekt (über die benötigte technische Infrastruktur) von der installierten Gesamtfläche ab.

Stärker ins Gewicht fallen die Kosten des Bauwerks: Beim Pult- und Satteldach steigen mit zunehmender Dach- bzw. Modul-Neigung die Herstellungskosten des Gebäudes.

Hieraus ergibt sich eine zweifache Abwägung:

1. jährlicher PV-Ertrag versus jährlicher Heizwärmebedarf
2. jährlicher Energiesaldo (d. h. möglichst Energieüberschuss) versus anfängliche Baukosten.

Stellgrößen sind dabei grundsätzlich die drei Dachformen (Flach-, Pult- und Satteldach) und die konkrete Panel- bzw. Dachneigung.

Die erste Abwägung erfolgt anhand der jeweiligen Bilanzbeträge eines Jahres. Dies entspricht der Idee des Net Zero Energy Building. Ziel ist also keine Autarkie, sondern ein möglichst hoher Nettobeitrag zur Stromerzeugung.

Die folgenden Zahlen beziehen sich jeweils auf ein freistehendes Einfamilienhaus mit 10 m × 10 m Grundfläche und zwei Vollgeschossen. Die Energiebezugsfläche (nach GEG) beträgt 200 m<sup>2</sup>, die Wohnfläche 150 m<sup>2</sup>; je nach Dachform und Ausbau des Dachgeschosses können sich die beiden Werte verändern. Der Dämmstandard orientiert sich an den aktuellen Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes für den Neubau. Jede Dachvariante wird technisch maximal mit PV-Modulen belegt. Die Zahlen beruhen auf detaillierten Berechnungen, sind jedoch bewusst grob gerundet, da es um die grundsätzlichen Effekte geht.

### PV-Ertrag nach Dachform

Beim Flachdach ist der Heizwärmebedarf unabhängig von der Ausrichtung und der Neigung der PV-Module. Werden sie nach Süden ausgerichtet, sinkt der Ertrag mit zunehmender Neigung. Der negative Effekt aus dem höheren Abstand der Module überwiegt dabei den positiven Effekt einer besseren Ausbeute pro Modul deutlich. Der Gesamtertrag bei einer 30°-Neigung ist ungefähr halb so groß wie beim flachen Hinlegen bzw. der Dachintegration der Module.

Die (Zick-Zack-)Ausrichtung nach Ost und West liefert – bei gleicher Neigung – fast den identischen Jahresertrag wie eine alternierende Süd-Nord-Ausrichtung. Eine höhere Neigung bringt dabei jeweils mehr Jahresertrag. Welche Neigung genau gewählt wird, macht aber letztlich nur etwa ±1 % beim Jahresertrag aus. Der Jahresertrag liegt fast beim Vierfachen des Strombedarfs für eine handelsübliche Wärmepumpe, mit der die Heizwärmeversorgung des Testgebäudes bereitgestellt werden kann.



Beim Pultdach entfällt das Problem der gegenseitigen Verschattung der Module. Bei Südausrichtung ergibt sich aber im Norden eine höhere Wand, die sowohl architektonisch und städtebaulich als auch hinsichtlich der Verschattung der Umgebung problematisch sein kann. Ab einer Dachneigung von  $15^\circ$  macht dies ein zusätzliches Geschoss aus. Wenn diese Lösung aus Sicht des Planungsrechts zulässig ist, kann damit zusätzlicher Wohnraum entstehen.

Rein auf den PV-Ertrag bezogen lohnt sich eine stärkere Neigung der Module. Vor allem eine flächendeckende Süd-Ausrichtung führt zu einem PV-Ertrag, der bei  $15^\circ$  Neigung knapp 10 % über dem eines Flachdaches mit entsprechend geneigter Ost-West-Ausrichtung liegt. Der Heizwärmebedarf steigt allerdings parallel um fast 20 %. Netto liegt der jährliche Stromüberschuss trotzdem ca. 6 % höher als beim Flachdach.

Beim Satteldach bringen eine Ost-West- und eine Süd-Nord-Ausrichtung jeweils ähnliche Jahreserträge. Während im ersten Fall beide Teilanlagen den gleichen Beitrag liefern, tragen im zweiten Fall die südlich ausgerichteten Module knapp 60 % zum Gesamtertrag bei. Um die gleiche Dachneigung zu erzielen, ist beim Satteldach nur die halbe Firsthöhe gegenüber der hohen Wand beim Pultdach notwendig. Dadurch lassen sich bei Ersterem deutlich steilere Dächer realisieren.

Dies führt auch zu einem klar höheren PV-Ertrag: Bei  $40^\circ$  Dachneigung liegt dieser um ca. ein Siebtel über dem des Flachdaches. Der Heizwärmebedarf steigt parallel um fast ein Viertel, der Jahresüberschuss an Solarstrom übertrifft den des Flachdaches um etwa ein Zehntel. Diese Zahlen nehmen ein als potenziell zum Wohnen zusätzlich nutzbares ausgebautes Dachgeschoss an. Wird hingegen die oberste Geschossdecke gedämmt, haben beide Varianten den gleichen Heizwärmebedarf und jedes zusätzliche Grad Neigung erhöht eins zu eins den Stromüberschuss.

Insgesamt führen jede Dachform und jede Neigung dazu, dass das Gebäude klar als Net Zero Energy Building eingestuft wird. Der PV-Ertrag übertrifft den Strombedarf für den Betrieb der angenommenen Wärmepumpe zum Heizen in der

Jahresbilanz deutlich. Den größten Überschuss erwirtschaftet ein steiles Ost-West-Satteldach. Am anderen Ende des Spektrums spricht wenig für ein Flachdach mit steiler Süd-Aufständigung; mit niedriger Ost-West-Ausrichtung kommt das Flachdach hingegen auf respektable Jahreswerte.

### Kosten nach Dachform

Bei der zweiten Abwägung sollen nun diese laufenden Jahreswerte in Relation zu den Baukosten betrachtet werden. Die klassische Investitionsüberlegung aus dem Gebäudebestand ist hierauf nicht übertragbar, da letztlich ja eine Alternative gewählt werden muss. Vergleichsmaßstab für diese Überlegung soll daher das Flachdach mit Ost-West-ausgerichteten und abwechselnd mit  $10^\circ$  geneigten Modulen sein. Das Flachdach ist die absolut günstigste Dachform. Wird das Dach im Rahmen der technischen Möglichkeiten komplett belegt, entsteht im Beispiel eine PV-Anlage mit über 15 kWp Leistung. Die Kosten dieser PV-Anlage dürften mehr als 5 % der gesamten Gebäudekosten ausmachen.

Beim Pultdach erhöhen die zusätzlichen Wandflächen sowie die größere Dachfläche die Baukosten. Hinzu kommen Mehrkosten für die Decke zwischen Ober- und Dachgeschoss. Im Beispiel erhöhen sich die Bau- und Anlagenkosten um ca. 30 %. Die Anlage ist nur unwesentlich größer als beim Flachdach-Referenzobjekt, ein Mehrnutzen ergibt sich aus der besseren Modulausrichtung. Jede kWh zusätzlicher Netto-Jahresertrag, also den Heizbedarf berücksichtigend, kostet deutlich mehr als 100 €.

Sinnvoll dürfte ein Pultdach gegenüber einem Flachdach daher nur sein, wenn das zusätzliche Dachgeschoss auch bewohnt wird. Nutzbar ist es allerdings wegen der Deckenhöhe nur etwa zur Hälfte, sodass die Wohnfläche um ca. ein Viertel zunimmt. Ein Kompromiss könnte daher ein Pultdach mit einer geringen Neigung von ca.  $5^\circ$  sein, bei dem auf eine zusätzliche Decke verzichtet und stattdessen eine komfortable Raumhöhe im Obergeschoss erzielt wird.

Kennzahlen des Beispielgebäudes

Dachform	Flachdach			Pulldach	Satteldach		
	30° Süd	10° Süd-Nord	10° Ost-West		40° Süd	40° Süd-Nord	40° Ost-West
PV-Module							
PV-Ertrag p.a. [kWh]	10.375	19.123	18.975	20.962	13.421	21.941	22.399
Heizenergie* p.a. [kWh]	14.423	14.423	14.423	17.184	17.828	17.828	17.828
Baukosten [Tsd. €]	457	469	469	606	599	615	615

Tabelle: Eigene Darstellung der Autor:innen

\*Bedarf; Primärenergiebedarf geringer wegen Wärmepumpeneinsatz.

Auch ein Satteldach ist mit höheren Baukosten als ein Flachdach verbunden. Wird das Satteldach nur im Süden mit PV-Modulen belegt, liegt der Solarertrag trotz Mehrkosten unter dem des Flachdachs. Bei 40° Neigung kann nur eine PV-Anlage mit ca. 10 kWp installiert werden. Ist die Dachgeschossnutzung nicht relevant, lohnt sich das einseitig belegte Satteldach gegenüber dem voll belegten Flachdach nicht. Bei beidseitiger Belegung gehen die konstruktiven Mehrkosten auch nach Abzug der zusätzlichen Heizenergie mit einem Mehrertrag einher. Für 40° Dachneigung beträgt dieses Kosten-Plus ca. 30 %. Aufgrund des relativ zum Pulldach geringeren Heizbedarfs wird jede kWh an jährlichem Netto-Solarertrag mit etwas weniger als 100 € erkaufte. Für sich genommen wirklich lohnend dürfte dies nicht sein, falls nicht Zusatzaspekte wie der Wohnraum im Dachgeschoss hinzukommen. Dieser ist allerdings geringer als beim Pulldach, da es hier zwei Dachschrägen gibt. Die Wohnfläche dürfte daher gegenüber dem Flachdach nur um ca. ein Sechstel zunehmen. Insgesamt stellt sich das Flachdach als wirtschaftlich vorteilhafteste Dachform heraus. Der Zugewinn an Solarertrag bei Pult- und Satteldach wird weniger vom zusätzlichen Heizwärmebedarf, sondern vielmehr durch die höheren Baukosten relativiert.

**Zusammenfassung**

Die Überlegungen haben gezeigt, dass die Solarstrahlung auch in unseren Breiten in der Regel dazu ausreicht, um auf Jahressicht eine Wärmepumpe mit Solarstrom vom Dach zu versorgen, wenn die energetische Qualität der Gebäudehülle hoch ist. Die Zahlen des Beispielobjektes gelten natürlich erst einmal nur für Einfamilienhäuser ähnlicher Proportionen; es lassen sich aber grundsätzlich übertragbare Aussagen für andere Gebäudeproportionen und Typen erkennen. Es hat sich gezeigt, dass ein Satteldach in der energetischen Jahresbetrachtung vorteilhaft ist. Je steiler die Dachneigung, umso größer ist der Vorteil. Werden jedoch die Baukosten hinzugenommen, erweist sich das Flachdach am attraktivsten. Zusätzlicher Wohnraum kann als Argument für ein Sattel- oder Pulldach sprechen – sofern die Ausführung mit den notwendigen Neigungen genehmigungsfähig ist. Wenn ein Dach mit Schräge gewählt wird, sollte es sich aus Sicht des PV-Ertrags möglichst eine optimale Ausrichtung haben. Die Überlegungen können daher im konkreten Fall nur als Ausgangspunkt dafür dienen, um konkrete Simulationen am entsprechenden Objekt vorzunehmen. Erst dann lohnt sich

eine genauere jahreszeitliche Betrachtung, bei der auch die Verschattung eine größere Rolle spielt. Gleiches gilt für das Zusammenspiel von Ausrichtung, Nutzungsprofil nach Tageszeiten und Batteriegröße.

Kommen ästhetische Aspekte hinzu, hat das Flachdach den Vorteil, dass eine Attika die Einsehbarkeit der Dachfläche und damit die Sichtbarkeit der PV-Module verhindern kann. Bei Schrägdächern ist das Dach als fünfte Fassade eines Hauses hingegen in gestalterischer Hinsicht mitzudenken. So erlauben es integrierte Materialien bzw. Bauteile, die Funktion der Energiegewinnung mit der Schutzfunktion des Daches zu kombinieren. Hierdurch sind neben dem gestalterischen Plus auch möglicherweise geringere Baukosten realisierbar; allerdings ist nach 20-30 Jahren, wenn die Solarfunktion technisch nachgelassen hat, die komplette Dachhaut zu ersetzen. Übergreifend lässt sich festhalten, dass die absehbare Umsetzung des Net-Zero-Building Standards in nationales Recht nicht zwangsweise zu bestimmten Dachformen führen wird, da – dank aktueller Dämmstandards – bei jeder Dachvariante in der bilanziellen Jahressicht mehr als genug Strom am Gebäude generiert wird.



PROF. DR. LEO CREMER hat seit Oktober 2016 die Professur für mathematische Methoden in der Bau- und Immobilienwirtschaft an der Hochschule RheinMain inne.



PROF. DR.-ING. CHRISTOPH DREBES, M. Sc., vertritt seit Oktober 2023 die Professur Ressourceneffizientes Planen, Bauen und Betreiben an der Hochschule RheinMain.



DIPL.-ING. (FH) CHRISTINE WEBER, M. Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Studiengang Immobilienmanagement an der Hochschule RheinMain.