

Plus Energie – Wie ist der Energiegewinn im Mehrfamilienhaus zu erreichen?

Margrit Schaede und Marc Großklos

Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Rheinstraße 65, 64295 Darmstadt, T: +49 6151 29040, m.schaede@iwu.de, m.grossklos@iwu.de

Vortrag

KURZFASSUNG

Der Bau von Mehrfamilienhäusern als Gebäude mit Energiegewinn ist aufgrund der geringeren verfügbaren (Dach-)flächen zur solaren Energieerzeugung pro m² Wohnfläche schwieriger als bei Einfamilienhäusern. Ein im März 2014 fertig gestelltes vermietetes Mehrfamilienhaus mit 17 Wohneinheiten zeigt nun wie ein Energiegewinn auch hier erreicht werden kann. Das ganzheitliche Effizienzkonzept, das aufbauend auf dem Passivhaus-Standard den Energiebedarf des Gebäudes in allen Bedarfsbereichen (Heizwärme, Wärme für Warmwasser, Haushaltsstrom und Hilfsstrom) reduziert und die Deckung des verbleibenden Energiebedarfs mit regenerativen Energien führen zum Energiegewinn des Gebäudes.

Zusätzlich zu dem realisierten Modellprojekt wurden in einer übergreifenden Studie die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Energiegewinn von Mehrfamilienhäusern untersucht: Gebäudegröße, Dachneigung und -ausrichtung, Fassaden-Photovoltaik, Verschattung, Gebäudeausrichtung, Anlagentechnik, klimatische Bedingungen und der Einfluss des Nutzerverhaltens.

Insgesamt zeigen das Modellprojekt und die Parameterstudien, dass auch Mehrfamilienhäuser als Gebäude mit Energiegewinn ausgeführt werden können und so langfristig einen Beitrag zur Energiewende leisten können. Der stark reduzierte Energiebedarf für Heizung, Warmwasser, Haushalts- und Hilfsstrom auf Basis des ganzheitlichen Effizienzkonzeptes ist dabei der Schlüsselfaktor für die Erzielung eines Energieüberschusses bei Mehrfamilienhäusern. Bei der Deckung des verbleibenden Energiebedarfs mit regenerativen Energien können verschiedene Anlagentechniken mit unterschiedlichen Vorteilen zum Ziel führen.

SCHLÜSSELWÖRTER

Passivhaus mit Energiegewinn PH+E, Plusenergie, Mehrfamilienhaus, Effizienzkonzept, regenerative Energien, Ausgleich von Bedarf und Erzeugung

EINLEITUNG

Der Bau von Mehrfamilienhäusern als Gebäude mit Energiegewinn ist aufgrund der geringeren verfügbaren (Dach-)flächen zur solaren Energieerzeugung pro m² Wohnfläche schwieriger als bei Einfamilienhäusern. Dass auch Mehrfamilienhäuser als Gebäude mit Energiegewinn errichtet werden können, zeigt das Projekt „Passivhäuser mit Energiegewinn“. Zuerst wird in diesem Beitrag die im Rahmen des Projektes verwendeten Randbedingungen zur Bilanzierung des Energieüberschusses bzw. das Passivhaus mit Energiegewinn vorgestellt. Im Anschluss folgen Auszüge der Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung des Modellprojektes in der Cordierstraße 4 sowie der darauf aufbauenden Studie zu Mehrfamilienhäusern als Passivhäuser mit Energiegewinn.

BILANZIERUNG DES ENERGIEÜBERSCHUSSES

Als **Bilanzgrenzen** werden für den Energiebedarf der gesamte im Gebäude benötigte Energiebedarf für Wärme und elektrische Energie einbezogen (vgl. Bild 1), nicht jedoch die Energie für Mobilität und den Herstellungsenergieaufwand des Gebäudes. Die Bilanzgrenze der Energieerzeugung bezieht sich auf die gesamte im und am Gebäude erzeugte Energie, Bilanzgrenze ist hier das gesamte zum Gebäude gehörende Grundstück. Die **Bilanzperiode** erstreckt sich über ein Jahr. Als **Energiequellen** nutzt das Passivhaus mit Energiegewinn ausschließlich regenerative Energieträger. Darunter fallen z. B. die solare Energieerzeugung durch solarthermische Anlagen und Photovoltaikanlagen, die Nutzung von Windenergie in der Nähe des Gebäudes oder der Einsatz von Biomasse. Bei Nutzung von Biomasse müssen jedoch zusätzliche Randbedingungen eingehalten werden: die Nutzung muss auf möglichst niedrigem Niveau gehalten werden, die Biomasse muss mit hoher Effizienz z. B. in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen verwendet werden, Umweltauswirkungen müssen weitestgehend reduziert werden und das **Biomasse-Potenzial** von maximal 35 kWh/(m²a) (vgl. [Diefenbach 2002]) muss eingehalten werden. Weiterhin sollte die bezogene Biomasse nachhaltig erzeugt werden und möglichst geringe Transportwege vorweisen, dies wird bei der Bewertung im Primärenergiefaktor berücksichtigt. Der Einsatz von Biomasse in einem Passivhaus mit Energiegewinn ist unter diesen Randbedingungen zielführend, wenn die Biomasse so effizient wie möglich genutzt wird (z. B. in KWK-Anlagen). Unter diesem Aspekt ist es auch vertretbar, wenn die Biomasse aus dem Umland bezogen wird – dies ist nicht anders zu bewerten als ein Gebäude, das seine Energie zeitweise aus dem elektrischen Netz z. B. für die Nutzung einer Wärmepumpe bezieht.

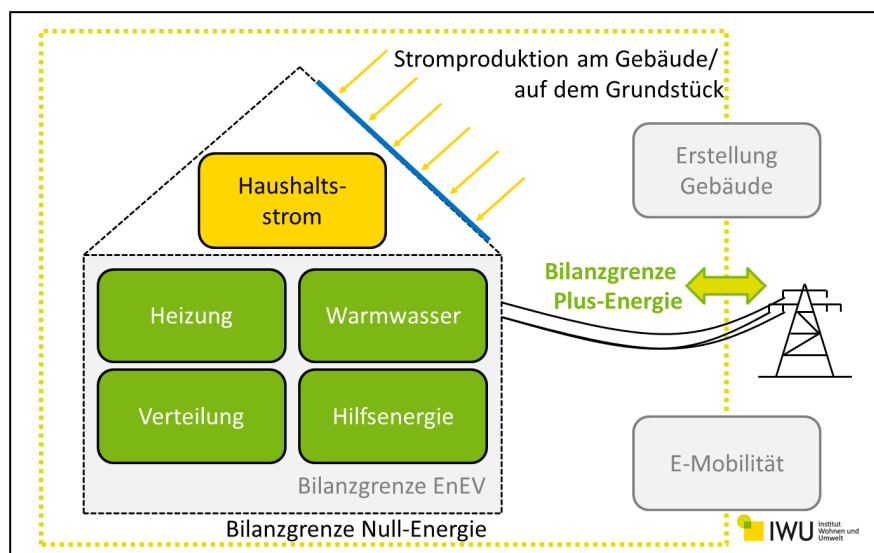


Bild 1: Bilanzgrenzen Plus-Energie

MODELLPROJEKT CORDIERSTRASSE 4 FRANKFURT AM MAIN

Das Gebäude Cordierstraße 4 ist kein Neubau auf der grünen Wiese mit optimalen städtebaulicher Randbedingungen und frei planbarer Gebäudehülle, sondern ein Ersatzneubau innerhalb eines Ensembles von ähnlichen Gebäuden, die nach dem Zweiten Weltkrieg in einfachster Bauweise wieder aufgebaut wurden. Aufgrund der

schlechten Bausubstanz fiel die Entscheidung, an gleicher Stelle auf der nahezu gleichen Grundfläche einen Neubau als Passivhaus mit Energiegewinn zu errichten. Bild 2 zeigt das Gebäude im Zuge der Fertigstellung, Tabelle 1 führt wesentliche Randdaten zum Gebäude auf.



Bild 2: Passivhaus mit Energiegewinn Cordierstraße 4, Ansichten - Südwest (links) und Ost (rechts)

Tabelle 1: Gebäudedaten

Standort	Cordierstraße 4, 60326 Frankfurt, Hessen
Wohnfläche (inkl. Balkone)	1237 m ²
Beheizte Wohnfläche	1170 m ²
Energiebezugsfläche (PHPP)	1219 m ²
Nutzfläche AN	1458 m ²
A/Ve -Verhältnis	0,39 m ⁻¹
Wohneinheiten	17
Gebäudeausrichtung	West-südwest (-65° Abweichung von der Südausrichtung)

Das vermietete Mehrfamilienhaus wurde von der ABG Frankfurt Holding errichtet, die Planung und Umsetzung erfolgte durch das Architekturbüro faktor10. Das Institut Wohnen und Umwelt führte die wissenschaftliche Begleitung des Projektes in der Planungsphase durch und erstellte aufbauend auf den Erfahrungen aus dem Bauvorhaben ein übertragbares Konzept „Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E)“. Dieses Forschungsprojekt wurde vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung gefördert. Der Bauherr erhält für das Projekt Cordierstraße 4 eine Förderung von der dena im Rahmen der dena-Modellvorhaben „Auf dem Weg zum EffizienzhausPlus“. Im Anschluss an die Bauphase wird ein Monitoring mit Betriebsoptimierung durchgeführt. Dies findet im Rahmen des Forschungsprogrammes des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (ehemals Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) für Modellprojekte im Effizienzhaus Plus-Standard statt.

Effizienzkonzept

Um auch bei Mehrfamilienhäusern in der Jahresbilanz einen Ausgleich von Erzeugung und Bedarf zu erreichen, muss zuerst die Energieeffizienz in allen Bedarfsbereichen erhöht werden. Aufbauend auf dem Passivhausstandard sind dazu vor allem Effizienzverbesserungen bei der Warmwasserbereitung und beim

Haushaltsstromverbrauch erforderlich. Aus diesem Grund wurde ein ganzheitliches Effizienzkonzept entwickelt. Die Eckpunkte dieses Konzeptes lauten:

- Reduzierung des Heizwärmebedarfs durch Bauweise im Passivhaus-Standard
- Reduzierung des Energiebedarfs für die Warmwasserbereitung durch Absenkung der Warmwassertemperatur, Verringerung der Verteilverluste und Einbauten zur Reduktion des Wasserverbrauchs
- Reduzierung des Hilfsstroms durch besonders effiziente Anlagentechnik
- Reduzierung des privaten Haushaltsstromverbrauchs durch Ausstattung der Küchen mit Geräten bester Energieeffizienzklassen, energieeffizienter Beleuchtung und vereinfachter Abschaltung des Standby-Verbrauchs

Bild 3 zeigt die Energieeinsparungen, die durch die Reduktion der Verluste der Warmwasserbereitung in der Cordierstraße 4 erzielt werden können. Durch eine erhöhte Leitungsdämmung um 250 % nach EnEV, die Reduktion der Warmwassertemperatur auf 48 °C und die Ausführung der vertikalen Zirkulationsleitungen als Rohr-in-Rohr-System (vgl. Bild 3 rechts) können die Verluste der zentralen Warmwasserbereitung nahezu halbiert werden. Die Reduktion der Warmwassertemperatur ist möglich, da durch den Einsatz einer Diaphragmalyse (vgl. Bild 3 unten rechts) auf die thermische Desinfektion verzichtet werden kann.

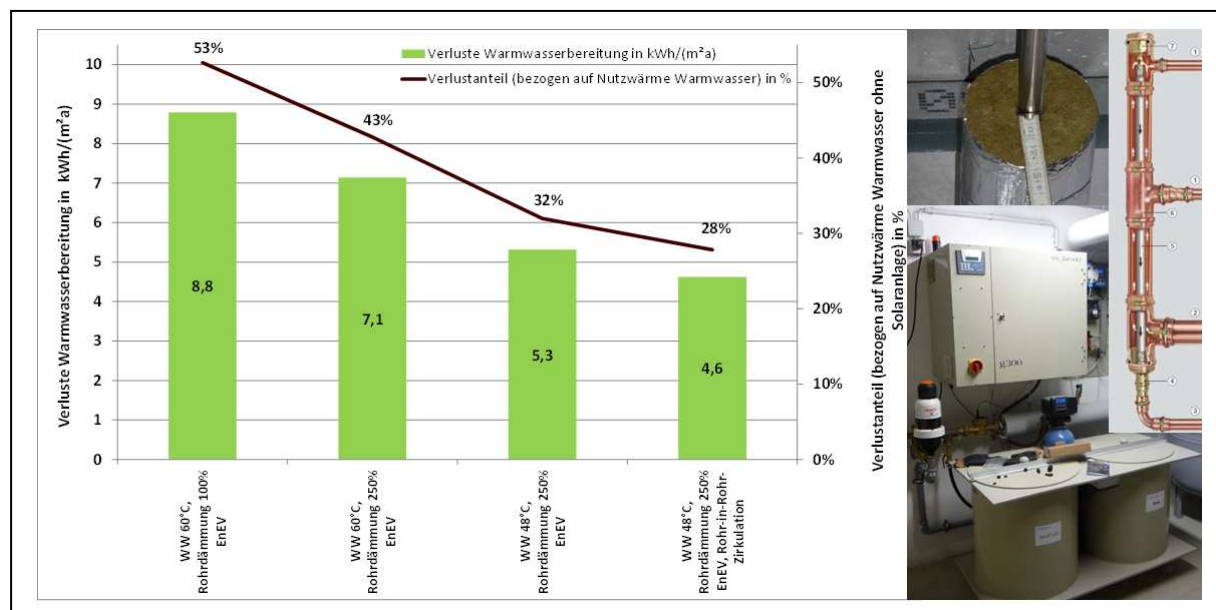


Bild 3: Reduktion der Verluste der Warmwasserbereitung

Grundlage der Reduktion des elektrischen Energiebedarfs ist die Ausstattung des Gebäudes mit energiesparenden Geräten (vgl. Bild 4). Erste positive Erfahrungen zur Verringerung des Stromverbrauchs durch entsprechende Maßnahmen konnten bereits im Projekt Rotlintstraße (vgl. [Großklos et al. 2013]) gesammelt werden. Die dort erfolgreich angewandten Maßnahmen zur Verringerung des Haushaltsstrom-Verbrauchs sind teilweise Vorinstallation effizienter Beleuchtung, Standby-Abschalter und die Nutzung von Trockenschränken. Dieses Konzept wurde für das Gebäude in der Cordierstraße um mehrere Komponenten erweitert, sodass die Wohnungen vom Vermieter mit hocheffizienten Küchen ausgestattet und in allen Räumen Standby-Abschalter sowie effiziente Beleuchtung auf Basis von LED installiert wurden. Bei der Anlagentechnik wurde auf energiesparende Pumpen und Beleuchtung geachtet.

Durch den Einsatz lediglich eines einzigen energiesparenden Aufzuges, der durch das Laubengangkonzept möglich wird, kann weitere Energie eingespart werden.



Bild 4: Reduktion des Haushalts- und Hilfsstrombedarfs

Technikkonzept

Nach Reduktion des Energiebedarfs in allen Bereichen erfolgt die Deckung des verbleibenden Energiebedarfs durch die Nutzung von Solarthermie, Photovoltaik und Kraft-Wärme-Kopplung in einem mit Biomethan betriebenen BHKW (vgl. Bild 5).

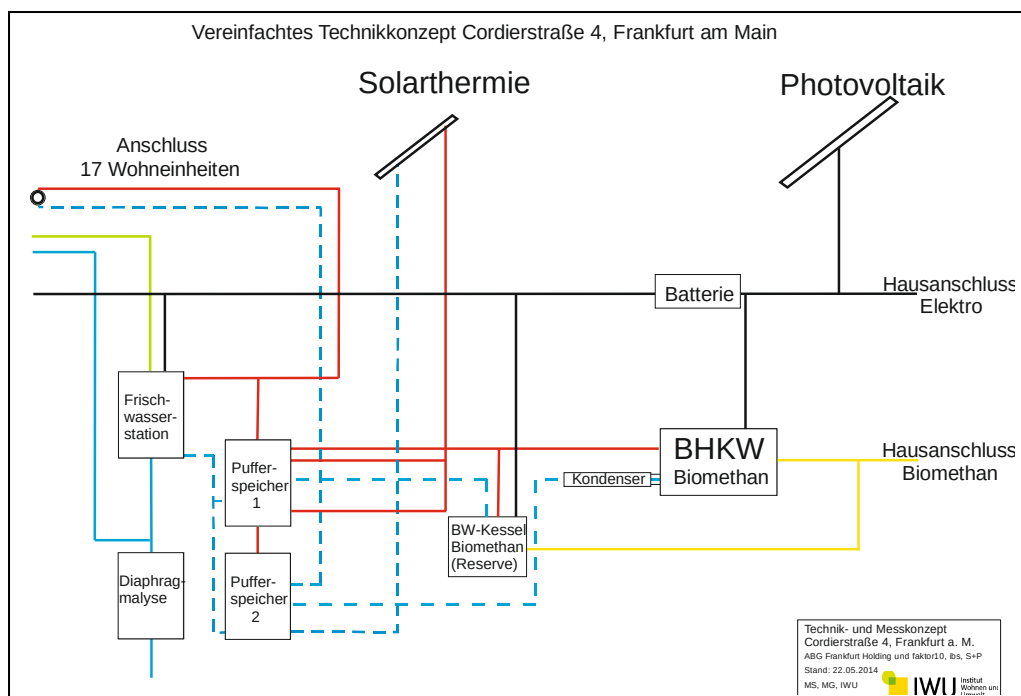


Bild 5: Technikkonzept Cordierstraße 4 Frankfurt am Main

Die solarthermische Anlage mit 40 m² Vakuumröhrenkollektor erzeugt ca. 60 % der Wärme, die für Warmwasser benötigt wird, das BHKW (5 kW_{el}, 12,3 kW_{th}, zusätzlich

2,3 kWth über einen Kondenser) ist für die Bereitstellung des gesamten darüber hinausgehenden Wärmebedarfs von Heizung und Warmwasser zuständig.

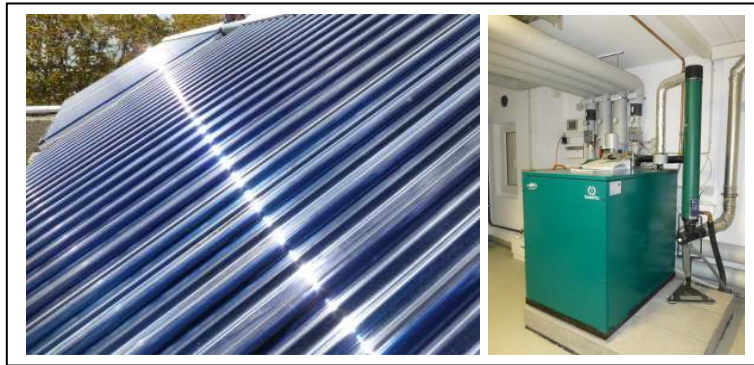


Bild 6: Wärmeerzeugung durch Solarthermie (links) und Biomethan-BHKW (rechts)

Zwei große Pufferspeicher von insgesamt fast 6 m³ (vgl. Bild 7 links) sorgen für eine hohe Deckung des Wärmebedarfs durch die solarthermische Anlage. Im Winter stellen die Pufferspeicher eine Leistungsreserve bereit, sodass das BHKW trotz seiner geringen thermischen Leistung den Wärmebedarf decken kann. Die Gastherme (35 kW) ist als Reserve vorgesehen und wird lediglich während der Wartung oder falls das BHKW ausfällt, eingesetzt.



Bild 7: Pufferspeicher Wärme (links) und elektrischer Energiespeicher (rechts)

Die Photovoltaikanlagen auf dem Dach, dem Carport und an der Südfassade (vgl. Bild 8) von insgesamt 49 kW_p sind zusammen mit dem BHKW für die Stromerzeugung zuständig. Durch den elektrischen Energiespeicher mit 27 kWh_{AC} (vgl. Bild 7 rechts) wird diese Energie vorrangig im Gebäude selbst verbraucht.



Bild 8: Photovoltaik auf Dach (links), Carport (Mitte) und an der Südfassade (rechts)

Ausgleich von Energiebedarf und -erzeugung

Die Kombination der Anlagentechniken Solarthermie, BHKW und Photovoltaik hat viele Vorteile. So wird durch die Kombination von solarthermischer Anlage und wärmegeführtem BHKW der Bedarf an regenerativem Brennstoff Biomethan begrenzt und das Biomasse-Potenzial von 35 kWh/(m²a) kann eingehalten werden. Weiterhin sorgt diese Kombination auch für einen sehr guten zeitlichen Ausgleich von Energiebedarf und Erzeugung (vgl. Bild 9), das elektrische Netz wird nicht als saisonaler Speicher genutzt.

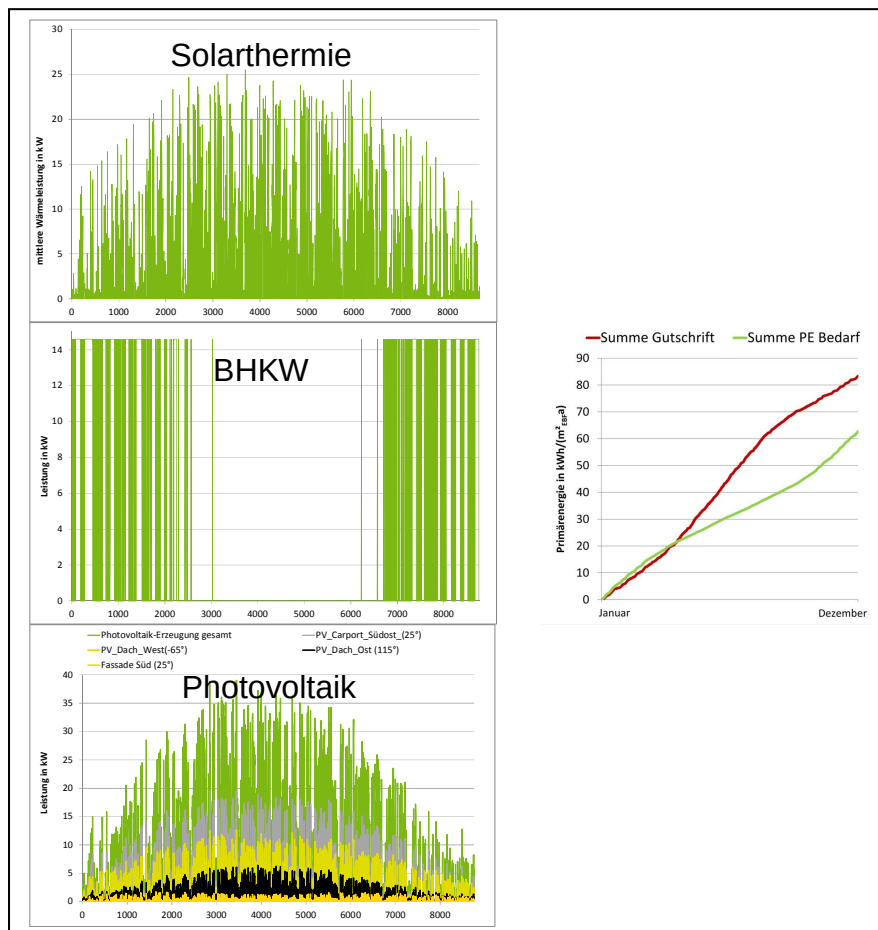


Bild 9: zeitlicher Verlauf der Energieerzeugung und sich ergebender Jahresverlauf von Primärenergiebedarf und -gutschrift

Die solarthermische Anlage stellt einen großen Teil der im Sommer und in der Übergangszeit benötigten Wärme bereit. Das BHKW wird dadurch hauptsächlich in den Wintermonaten genutzt, in denen ein erhöhter Wärmebedarf bei nur geringem Ertrag der Photovoltaik-Anlage vorliegt. Das BHKW und die Photovoltaik-Anlage ergänzen sich somit bei der Erzeugung von elektrischer Energie sehr gut, sodass auch im Winter ein großer Teil des Stromverbrauchs durch die Eigenerzeugung gedeckt wird. Auch primärenergetisch ist die Energiebilanz ausgeglichen. Ein weiterer Indikator für die zeitliche Übereinstimmung von Bedarf und Erzeugung ist die Deckungsrate (vgl. Eqn. 1). Dieser Begriff wird von [Voss et al. 2011] genutzt um den Einfluss von Netto-Nullenergiehäusern auf das elektrische Netz zu charakterisieren. Die Berechnung erfolgt mit

$$f_{Last,i} = \min \left[1, \frac{\text{Eigenstromerzeugung}}{\text{Stromverbrauch}} \right] * 100 \quad [\%]$$

Eqn.1

mit: i=Zeitintervall (Stunde, Tage, Monate, Jahr)

Für das hier betrachtete Mehrfamilienhaus in der Cordierstraße ergeben sich die in Bild 11 dargestellten Deckungsraten. Aufgetragen ist der Mittelwert der sich innerhalb eines Jahres ergebenden Deckungsraten in Abhängigkeit des Zeitintervalls i. Die Berechnung beinhaltet noch nicht den elektrischen Energiespeicher. Der KWK-Strom wurde dabei analog der Verfahrensweise für Solarstrom bilanziert.

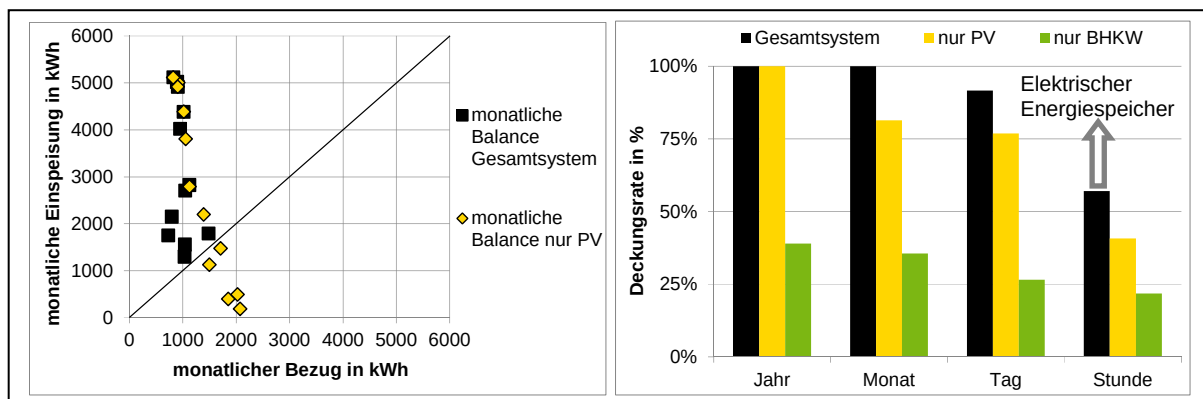


Bild 11: Stromerzeugung – monatliche Einspeisung und monatlicher Bezug (links) und Deckungsraten abhängig von der Zeitschrittweite (rechts) für die Kombination von PV und BHKW (schwarz), ein „nur PV“-Konzept (gelb) und ein „nur BHKW-Konzept“ (grün)

Deutlich zu erkennen ist, dass durch die Kombination (schwarz) der beiden Techniken Photovoltaik (gelb) und BHKW (grün) die stündliche, tägliche und monatliche Deckungsrate stark erhöht werden. Durch den zusätzlichen Einsatz eines elektrischen Energiespeichers erhöht sich die stündliche Deckungsrate. Der elektrische Energiespeicher ist in diesem Fall auf einen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch zwischen Tag und Nacht ausgelegt.

Energiebilanz des Gebäudes Cordierstrasse 4

Der Energiebedarf des Gebäudes (vgl. Bild 12) und seine Deckung durch regenerative Energien spiegeln die Projektziele wieder: Die hohe Energieeffizienz des Gebäudes und seiner Ausstattung zeigt sich durch die niedrigen Bedarfswerte für Wärme (Heizung 15,21 kWh/(m²a), Warmwasser 16,61 kWh/(m²a)), Verluste (Heizung 0,9 kWh/(m²a), Warmwasser 4,56 kWh/(m²a)) sowie elektrische Energie (Haushaltsstrom 14,43 kWh/(m²a), Hilfsstrom 6,93 kWh/(m²a)). Die für solare Energieerzeugung nutzbaren Flächen werden mit effizienten Komponenten optimal genutzt, so dass eine hohe solarthermische Wärmeerzeugung und eine hohe Energieerzeugung durch Photovoltaik erreicht werden. Das Biomethan-BHKW erzeugt die restliche benötigte Wärme und gleichzeitig elektrische Energie. Insgesamt kann auf diese Weise ein Überschuss an elektrischer Energie in Höhe von 20,4 kWh/(m²a) erreicht werden.

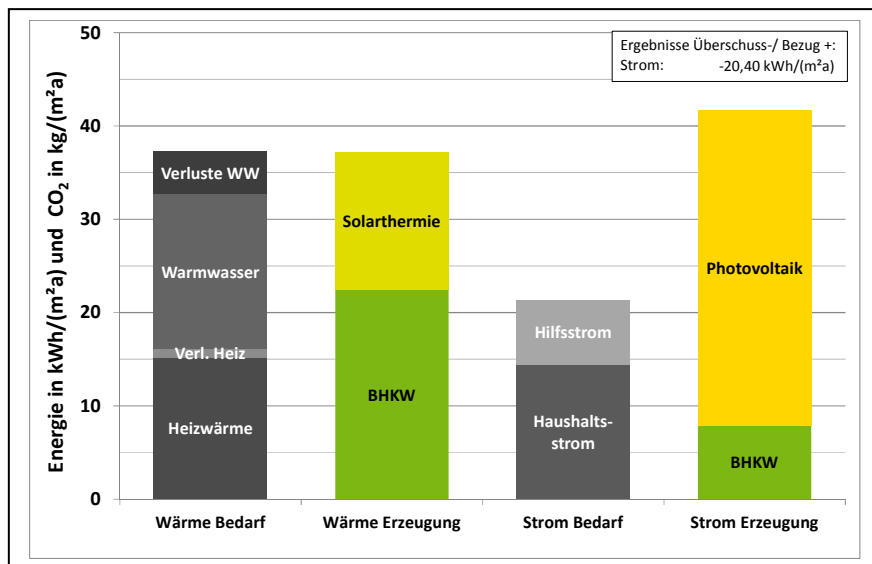


Bild 12: Energiebedarf und -erzeugung des Gebäudes Cordierstraße 4

Bild 13 zeigt die Energiebilanz des Gebäudes anhand unterschiedlicher Bilanzierungsverfahren. Generell zeigt der Vergleich der Energiekennwerte mit dem Referenzgebäude nach EnEV, unabhängig vom Bilanzierungsverfahren, die sehr hohe erreichte Energieeinsparung, die im Neubau heutzutage umsetzbar ist.

			PH + E	EffizienzhausPlus BMVBS	EnEV 2009/DIN V 18599	Referenzgebäude EnEV
	spez. Transmissions- wärmeverlust	W/(m²K)		0,199	0,199	0,5
	Interne Gewinne	W/m²	2,1	4,2	4,2	4,2
Bezugsfläche			EBF	AN	AN	AN
	Fläche	m²	1219,43	1458,40	1458,40	1458,40
Energiebedarf						
	Nutzenergiebedarf Heizung/ Heizwärmebedarf	kWh/(m²a)	15,21	9,23	9,23	47,94
	Nutzenergiebedarf Warmwasser	kWh/(m²a)	16,61	12,84	12,84	12,84
	elektrischer Energiebedarf Hilfsenergie	kWh/(m²a)	6,93	6,17	6,17	2,83
	elektrischer Energiebedarf Beleuchtung & Haushalt	kWh/(m²a)	14,43	16,05	0,00	0,00
Endenergiebedarf (ohne Verrechnung Gutschrift oder EnEV §5)						
	Heizung	kWh/(m²a)	16,10	12,53	12,53	66,74
	Warmwasser	kWh/(m²a)	6,35	8,58	8,58	23,30
Bilanzkennwerte						
	elektrische Energieerzeugung	kWh/(m²a)	41,76	26,69	5,08	0,00
	elektrischer Energiebedarf nach Erzeugung	kWh/(m²a)	-20,40	-4,48		
	Endenergiebedarf	kWh/(m²a)	9,95	-4,48	16,03	90,03
	Primärenergiebedarf	kWh/(m²a)	-22,43	-15,33	19,27	97,85
Verwendete Primärenergiefaktoren			Gemis 4.8	BMVBS	EnEV	EnEV
	Strom Bezug	kWh/kWh	2,21	2,40	2,60	2,60
	Strom Einspeisung	kWh/kWh	2,21	2,80		
	Biomethan	kWh/kWh	0,30	0,50	1,10	
	Photovoltaik	kWh/kWh	0,40	0,00	0,00	
	Erdgas	kWh/kWh				1,10

Bild 13: Energiebilanz Cordierstraße 4 nach verschiedenen Bilanzierungsverfahren

Der Vergleich der Bilanzergebnisse zwischen Passivhaus mit Energiegewinn (PH+E) (vgl. Bild 13) und dem „Effizienzhaus Plus BMVBS“ zeigt wesentliche Unterschiede in den Randbedingungen der Bilanzierung. So z. B. den unterschiedlichen Flächenansatz von der Energiebezugsfläche 1219 m² nach PHPP (für PH + E) und A_N 1458 m² nach EnEV (EffizienzhausPlus BMVBS), oder auch den

unterschiedlichen Ansatz der internen Gewinne im PHPP mit $2,1 \text{ W/m}^2_{\text{EBF}}$ und nach EnEV2009/DIN V 18599 mit $4,2 \text{ W/m}^2_{\text{AN}}$. Weiterhin wurden unterschiedliche Primärenergiefaktoren angesetzt. So wurden bei der Energiebilanz nach PHPP Primärenergiefaktoren nach Gemis verwendet und zusätzlich ein PE-Faktor für Photovoltaik inklusive Aufständigung berücksichtigt, während nach DIN V 18599 kein PE-Faktor für Photovoltaik berücksichtigt wird und der eingespeiste Strom mit dem Verdrängungsstrommix von 2,8 bilanziert wird. Weiterhin ergibt sich ein wesentlicher Unterschied in der Bilanzierung des BHKWs. Für die Energiebilanz des Effizienzhauses Plus wurde hier die DIN V 18599 Teil 9 angewendet, wodurch die Stromproduktion des dezentralen BHKWs unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren als Abzug vom Endenergiebedarf des Wärmeerzeugers in die Bilanz einfließt. Auf diese Weise wird es trotz Brennstoffeinsatz möglich, in der Endenergiebilanz einen Energieüberschuss zu erreichen. Bei der Bilanzierung nach PHPP in Verbindung mit Primärenergiekennwerten nach GEMIS ist dies nicht möglich. Aufgrund der unterschiedlichen Bilanzierung des BHKWs sind die Bilanzkennwerte elektrische Energieerzeugung, elektrischer Energiebedarf nach Erzeugung und Endenergiebedarf zwischen den dargestellten Varianten PH+E und Effizienzhaus Plus daher nicht vergleichbar.

Insgesamt ist das Ergebnis des Passivhauses mit Energiegewinn, unabhängig vom Bilanzierungsverfahren, als sehr gut einzustufen. Die dargestellten Bilanzierungsverfahren haben beide ihre Vor- und Nachteile, die durch den Vergleich teilweise sichtbar werden: Das Bilanzierungsverfahren nach PHPP in Verbindung mit GEMIS-Primärenergiefaktoren stellt das Gebäude aufgrund der Ausweisung eines bestehenden Endenergiebedarfs weniger optimistisch dar, als das Bilanzierungsverfahren des Effizienzhauses Plus. Auf der anderen Seite ist die Bilanz des Effizienzhauses Plus aufgrund der Anwendung der unterschiedlichen Primärenergiefaktoren für Strom und der beschriebenen Bilanzierung des BHKWs schwieriger nachvollziehbar.

PARAMETERVARIATIONEN DER AUSWIRKUNGEN AUF DIE ENERGIEBILANZ

Auf Basis der Ergebnisse des Modellprojektes in der Cordierstraße 4 wurden Parameterstudien durchgeführt, um die wesentlichen Parameter, die Auswirkungen auf die Energiebilanz und den erzielbaren Energie-Überschuss des Gebäudes haben, zu identifizieren. Für die Parameterstudien wurden Mehrfamilienhäuser als Modellgebäude in unterschiedlicher Größe betrachtet. Es wurde das beschriebene Effizienzkonzept aus der Cordierstraße vorausgesetzt.

Einfluss der Gebäudegröße

Die Gebäudegröße hat einen sehr großen Einfluss auf den erzielbaren Energieüberschuss des Gebäudes. Da sich die Größe der Modellgebäude im Wesentlichen anhand der Stockwerke unterscheidet, zeigt sich hier der Effekt, dass allen Modellgebäuden die gleiche Dachfläche für die solare Energieerzeugung zur Verfügung steht. Somit kann mit steigender Gebäudegröße weniger Photovoltaikertrag pro $\text{m}^2_{\text{Energiebezugsfläche}}$ erzielt werden. Der Zusammenhang zwischen Gebäudegröße, Energiebedarf und -erzeugung, sowie die daraus resultierenden

Energiekennwerte zeigen insbesondere für große Mehrfamilienhäuser sehr anschaulich die hohe Bedeutung der Nutzung aller Effizienzpotenziale vor dem Einsatz regenerativer Energien. Die aktuelle Diskussion, welcher energetische Standard zur Erreichung eines Energieüberschusses benötigt wird, muss daher im Bereich großer Mehrfamilienhäuser nicht umfänglich geführt werden. Denn hier ist die Erreichung des Ziels des Energieüberschusses nur durch einen sehr hohen energetischen Standard des Gebäudes, z. B. den Passivhausstandard, zu erreichen.

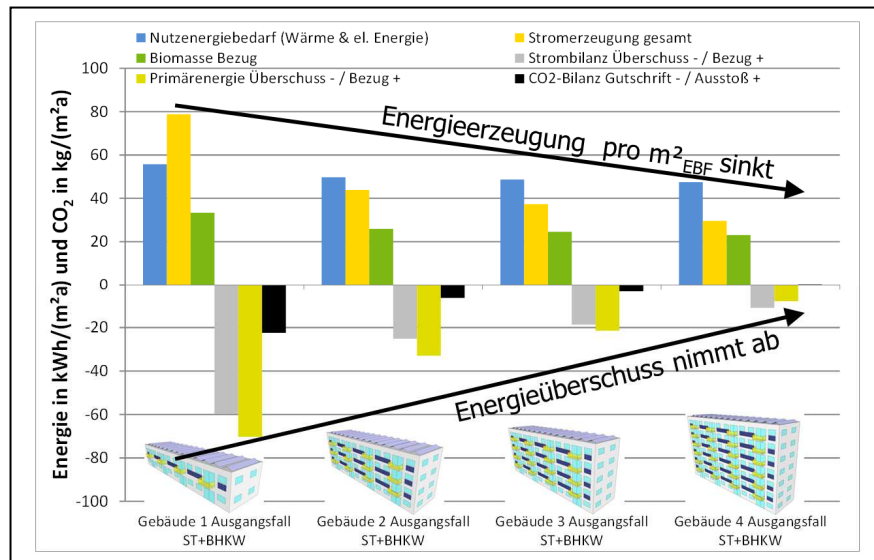


Bild 14: Passivhaus mit Energiegewinn Cordierstraße 4 Südwest-Ansicht (links) und Ost-Ansicht (rechts)

Gleichzeitig zeigt Bild 14 auch, welche hohen Energiegewinne bei kleineren Gebäuden unter Ausnutzung aller Effizienzpotenziale möglich wären. In der Praxis werden Gebäude dieser Größe, die einen Energiegewinn erzielen sollen, aktuell nicht mit diesen hohen Energieüberschüssen realisiert. Gründe sind hier zum einen in den Kosten zu suchen. Bei diesen Gebäuden ist davon auszugehen, dass häufig auf weniger effiziente, aber kostengünstigere Photovoltaik als in den hier dargestellten Beispielrechnungen gesetzt wird. Weiterhin werden kleine Gebäude, die einen Energieüberschuss erzielen sollen, nur selten im Passivhausstandard gebaut und es besteht kein Anreiz, besonders hohe Energieüberschüsse zu realisieren.

Einfluss der Dachausrichtung und -neigung

Aufgrund der geringeren zur Verfügung stehenden Flächen für die solare Energieerzeugung bei Mehrfamilienhäusern müssen die vorhandenen Flächen bestmöglich ausgenutzt werden. Um einen hohen Ertrag zu erzielen, müssen daher hocheffiziente Photovoltaik-Module genutzt werden. Mittlerweile sind Module mit einem Wirkungsgrad von bis zu 20 % verfügbar. Zusätzlich muss die zur Verfügung stehende Fläche bestmöglich ausgenutzt, bzw. bestmöglich mit Modulen belegt werden. Um diese Zusammenhänge darzustellen, wird im Folgenden jeweils der absolute erzielbare Ertrag aus der gesamten Dachfläche der Modellgebäude dargestellt. Die für die solare Energieerzeugung berücksichtigte Dachfläche ergibt

sich dabei nach Abzug von Abständen zum Dachrand und Flächen die für Sicherungsvorrichtungen benötigt werden (analog des Projektes Cordierstraße).

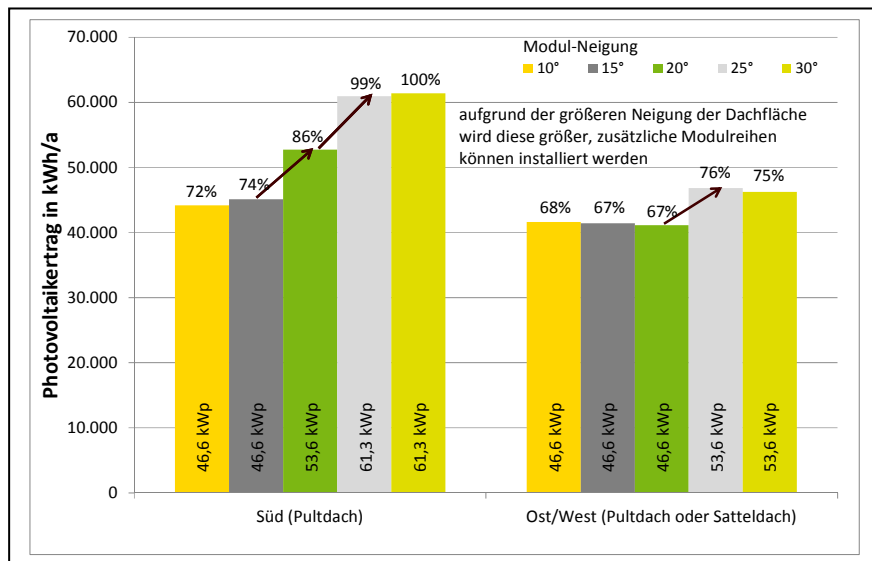


Bild 16: Parameterstudie: Dachneigung und Ausrichtung - absoluter Photovoltaik-Ertrag der Modellgebäude bei einem Pulldach

Bild 16 zeigt die absoluten Erträge des Daches, abhängig von Ausrichtung und Neigung des Daches. Erwartungsgemäß erreicht das nach Süden ausgerichtete Pulldach mit einer Neigung von ca. 30° den höchsten Ertrag. Mit steigender Neigung können hier aufgrund der größer werdenden Dachfläche mehr Module installiert werden, zusätzlich steigt der spezifische Energieertrag der Module mit steigender Neigung und erzielt bei ca. 30° sein Optimum. Die optimale Dachform zur größtmöglichen Energieerzeugung aus Photovoltaik ist daher das nach Süden ausgerichtete Pulldach. Kann dieses in Städten bzw. Bestandsquartieren nicht realisiert werden, können auch mit Ost-/West ausgerichteten Dächern und Flachdächern bei Ost-/West-Aufständigung der Photovoltaik zielführende Erträge erwirtschaftet werden.

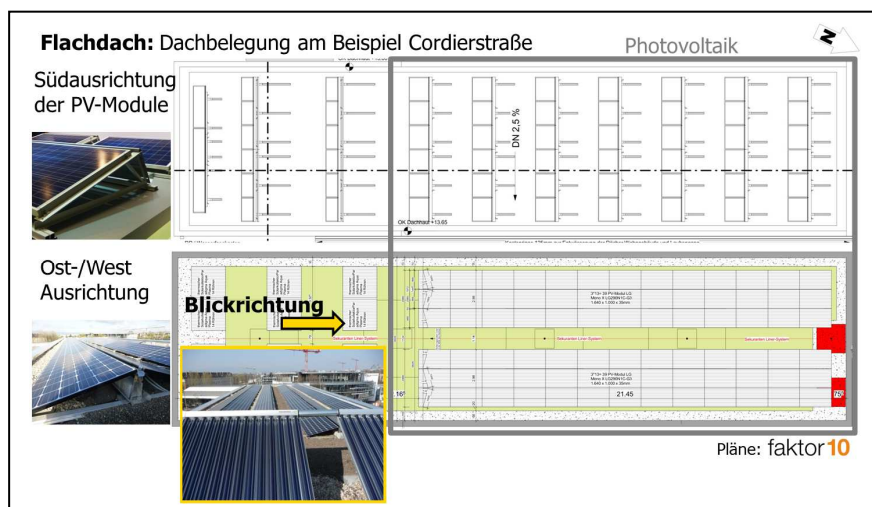


Bild 17: Dachbelegung eines Flachdachs mit Photovoltaik

Bild 17 zeigt zur Veranschaulichung der Ost-/West-Aufständigung der Module zwei unterschiedliche Planungsstände der Dachbelegung aus dem Projekt Cordierstraße. Da bei der Aufständigung Richtung Süden ein Verschattungsabstand zwischen den Modulen berücksichtigt werden muss, fällt der Energieertrag des Daches geringer aus als bei Ost/West Ausrichtung der Module, auch wenn der spezifische Ertrag in kWh/(kWp*a) bei Südausrichtung höher ist.

Bild 18 zeigt die Energieerträge des Flachdachs, mit nach Süden aufgeständerten Modulen und zum Vergleich mit Ost/West aufgeständerten Modulen. Hier ist auch hier der Effekt zu sehen, dass bei Südausrichtung der spezifische Ertrag mit steigender Neigung eher steigt, während bei Ost/West-Ausrichtung der Ertrag mit steigender Neigung sinkt. Zusätzlich tritt der Effekt auf, dass mit steigender Modulneigung bei Südausrichtung der benötigte Abstand zwischen den Modulen steigt (Annahme eines Verschattungswinkels von 26°), so dass mit steigender Neigung der Module weniger Modulreihen installiert werden können. Dies zeigt einmal mehr die Bedeutung der individuellen Planung einer Photovoltaikanlage, um die Dachfläche optimal ausnutzen zu können.

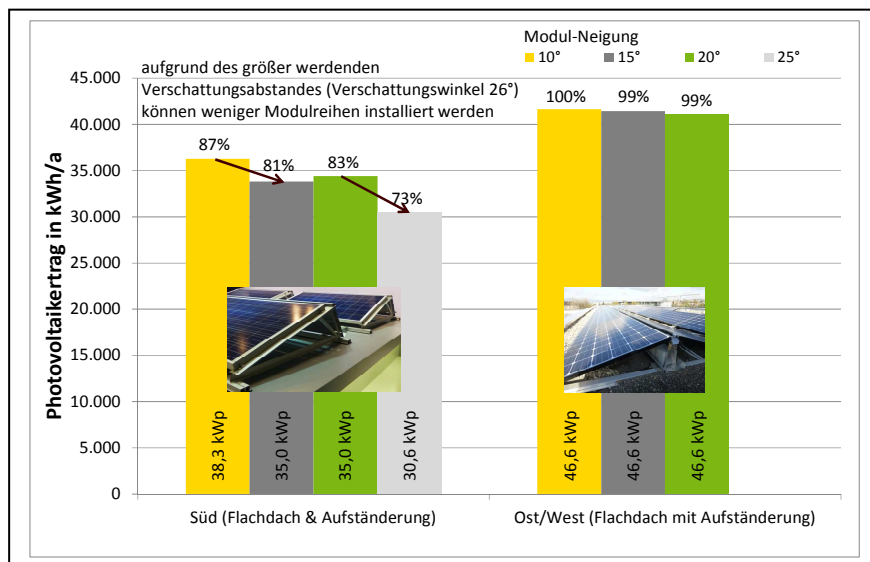


Bild 18: Einflüsse auf den Energiegewinn: Neigung und Ausrichtung der Module - absoluter Ertrag der Modellgebäude bei einem Flachdach

Im Vergleich zu einem 30° nach Süd geneigten Pultdach fällt der bestmögliche Ertrag des Flachdachs in diesem Beispiel ca. 30 % geringer aus.

Vergleich unterschiedlicher Anlagentechnik

Der Vergleich des Einsatzes von Solarthermie und Blockheizkraftwerk mit einer Wärmepumpe zeigt, dass beide Konzepte die energetischen Ziele erreichen. Mit zunehmender Gebäudegröße wird Energieüberschuss unabhängig von der Anlagentechnik schwieriger erreichbar (vgl. Bild 19). Dies zeigt einmal mehr die Bedeutung der Energieeffizienz des Gebäudes und aller Bereiche des Energiebedarfs. Bei großen Gebäuden müssen effizientere (teurere) Wärmepumpen mit sehr hohen Jahresarbeitszahlen eingesetzt werden, um den Energieüberschuss

erreichen zu können. Alternativ können hier Konzepte mit regenerativ versorgten Blockheizkraftwerken eingesetzt werden.

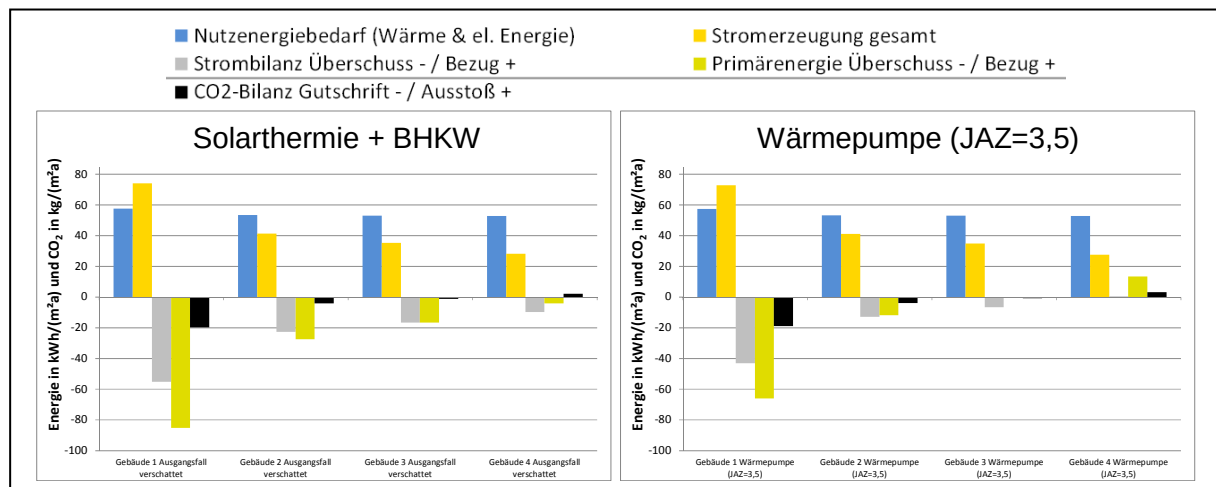


Bild 19 Verschiedene Anlagentechniken erreichen ähnliche Ergebnisse

Weitere wesentliche Einflüsse auf den Energiegewinn

Zusätzlich zu den dargestellten Untersuchungen zu Gebäudegröße, Photovoltaik auf dem Dach und Anlagentechnik wurden in der Parameterstudie weitere Aspekte untersucht:

Fassaden-Photovoltaik wird mit steigender Gebäudegröße bzw. -höhe immer wichtiger. Da weniger Dachfläche zur solaren Energieerzeugung pro m² Wohnfläche zur Verfügung steht, müssen weitere für die Energieerzeugung geeignete Flächen ausgenutzt werden.

Die **Verschattung** hat einen wesentlichen Einfluss auf die Zielerreichung, da weniger solare Energieerzeugung zur Verfügung steht.

Die **Ausrichtung** der Gebäude hat bei den Modellgebäuden bei einem Flachdach mit Ost-/West-Aufständigung der Photovoltaik nur geringe Auswirkungen auf die Erreichung eines Energiegewinns. Wesentlicher Einflussfaktor ist hier die Photovoltaik-Anlage an der Fassade, die bei großen Mehrfamilienhäusern als PH+E benötigt wird, um den Energiegewinn erreichen zu können.

Es wurde die Umsetzung des Konzepts an vier **Standorten** in Deutschland mit unterschiedlichem Klima und hoher oder niedriger Solarstrahlung untersucht. Aufgrund der Passivhausbauweise der Gebäude ist der Einfluss der Außentemperatur am Standort auf den Heizwärmebedarf nicht besonders hoch. Größeren Einfluss hat die am Standort verfügbare Sonnenstrahlung zur solaren Energiegewinnung auf den Energieüberschuss des Gebäudes. Grundsätzlich lässt sich das Konzept aber an allen untersuchten Standorten umsetzen.

Der **Nutzereinfluss** auf den Heiz- und den Warmwasserbedarf wurde durch Raumtemperaturen zwischen 20 °C und 23 °C sowie eine Erhöhung des Warmwasserbedarfs um 20 % bzw. 40 % untersucht. Es zeigte sich, dass die Wärmepumpenvariante sensibler auf eine Veränderung der Nutzungsbedingungen reagiert und bei erhöhten Raumtemperaturen kein Primärenergieüberschuss mehr erreicht wird. Bei einer Wärmeherzeugung über Solarthermie und BHKW ist die Primärenergiebilanz robust gegenüber veränderten Randbedingungen, jedoch wird bei deutlich erhöhten Raumtemperaturen und vermehrtem Warmwasser-

verbrauch das Biomassepotenzial überschritten. Dies zeigt, dass auch die Nutzer einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen eines Gebäudekonzepts mit Energieüberschuss beitragen können.

FAZIT

Das Modellprojekt in der Cordierstraße zeigt, ein Energiegewinn im Mehrfamilienhaus ist möglich durch Reduktion des Energiebedarfs in allen Bereichen und Einsatz regenerativer Energien. Dabei können verschiedene Anlagentechniken zum Ziel führen. Die Nutzung von Photovoltaik in Kombination mit der sparsamen Nutzung von regenerativen Brennstoffen in einem BHKW führt zu einem stärkeren Ausgleich des Jahresverlaufs von Bedarf und Erzeugung im Vergleich zu reinen Photovoltaik-Konzepten mit Wärmepumpen.

Die Parameterstudien bestätigen, dass eine sehr hohe Energieeffizienz in allen Bereichen Grundlage für den Energieüberschuss sein sollte - dadurch ist das das Passivhaus mit Energiegewinn auch bei großen Gebäuden möglich. Ein sehr wichtiger Faktor für die Erzielung des Energieüberschusses ist die optimale Ausnutzung der Möglichkeiten für die solare Energieerzeugung. Nicht optimale Gebäudeausrichtung, klimatische Randbedingungen und Verschattung haben aufgrund des PH-Standards nur mäßigen Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes, jedoch Einfluss auf die Energieerzeugung.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die Förderung dieses Projektes beim Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung. Die Berichte zur wissenschaftlichen Begleitung des Neubauvorhabens Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main sowie der Endbericht zum Projekt Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E) sind unter www.iwu.de kostenfrei abrufbar.

REFERENZEN

Diefenbach, N. (2002): *Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasseheizsystemen*, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, 2002

Großklos, M., Schaede, M.; Hacke, U. (2013): *Ergebnisse der Modernisierung von sieben Mehrfamilienhäusern auf Passivhaus-Standard*, 17. Passivhaustagung, Frankfurt, 2013

Passivhaus Institut (2012): *Passivhaus Projektierungs-Paket*, Version 7.1

Schaede, M., Großklos, M. (2014): *Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E) - Endbericht*. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2014.

Schaede, M., Großklos, M. (2013): *Passivhäuser mit Energiegewinn – Wissenschaftliche Begleitung Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main*, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2013, ISBN 978-3-941140-33-2.

Voss, K., Musall, E. and Lichtmeß, M. (2011): From Low-Energy to net Zero-Energy Buildings: Status and Perspectives; *Journal of Green Building*, Volume 6, Number 1; 2011