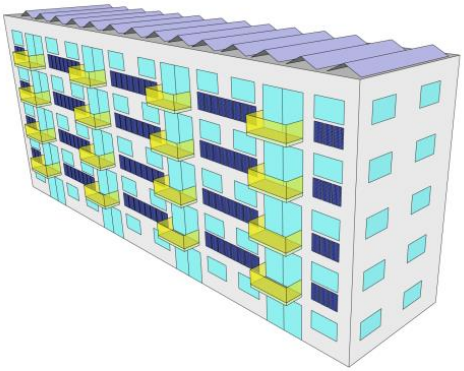
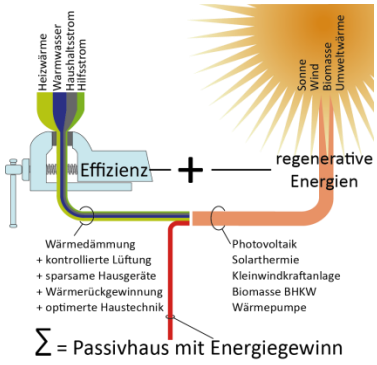
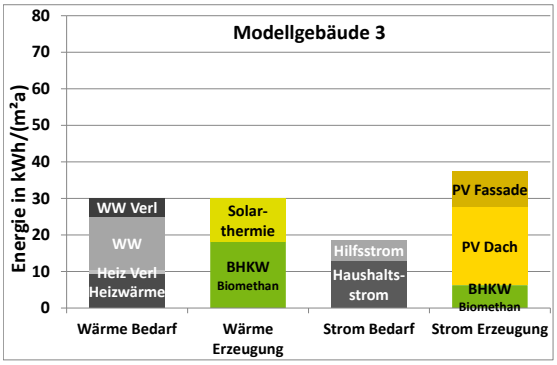
IWU Institut Wohnen und Umwelt

Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E)







Endbericht

Eine Untersuchung im Auftrag von:

HESSEN Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung

Mehrfamilienhäuser als
Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E)

Autoren: Margrit Schaede
Marc Großklos

Reprotechnik: Reda Hatteh

Darmstadt, den 10.02.2014

INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH
Rheinstraße 65
64295 Darmstadt
Germany

Telefon: +49(0)6151/2904-0 / Fax: -97
Internet: www.iwu.de

Inhalt

1 Einleitung 5

2 Gebäude mit einem Überschuss in der Jahresenergiebilanz 9

2.1 Bestehende Definitionen für Gebäude mit jahreszeitlichem Ausgleich in der Energiebilanz 9

2.2 Bestandteile der Definition von Gebäudestandards 13

2.3 Anforderungen an das Passivhaus mit Energiegewinn (PH+E) 21

2.4 Spezifischer kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen regenerativer Energieträger 22

2.5 Bilanzierungswerkzeuge 25

3 Der Weg zum PH+E: Reduktion des Energiebedarfs 27

3.1 Warum die Reduktion des Energiebedarfs so wichtig ist 27

3.2 Heizenergie 29

3.3 Energiebedarf für die Warmwasserbereitung 30

3.4 Haushaltsstrom 33

3.5 Hilfsenergie 37

3.6 Nutzerverhalten 38

4 Deckung des Energiebedarfs mit regenerativen Energien 40

4.1 Wärmeerzeugung 40

4.1.1 Wärmepumpen 40
4.1.2 Aktuelle Entwicklungen bei Wärmepumpen 44
4.1.3 Solarthermie 48
4.1.4 Blockheizkraftwerke 52
4.1.5 Weitere Typen von KWK-Anlagen für Passivhäuser mit Energiegewinn 55
4.1.6 Biomassekessel und -öfen 60
4.1.7 Vorschlag zur Zertifizierung des Biomethanbezugs eines Gebäudes 61
4.1.8 Gegenüberstellung der Techniken der Wärmeerzeugung 64

4.2 Stromerzeugung 65

4.2.1 Photovoltaik 65
4.2.2 Klein-Windkraft 69
4.2.3 Auswirkungen unterschiedlicher Stromkennzahlen der KWK auf die Energiebilanz eines Passivhauses mit Energiegewinn 74
4.2.4 Auswirkungen verschiedener elektrischer Energieerzeuger auf das Netz 76
4.2.5 Gegenüberstellung der Techniken der Stromerzeugung 80

5 Parameterstudie für Passivhäuser mit Energiegewinn 81

5.1 Vorstellung der Modellgebäude 81

5.2 Parametervariationen 84

5.2.1 Einfluss der Gebäudegröße 84
5.2.2 Dachneigung – Auswirkungen auf die Photovoltaikerzeugung 87
5.2.3 Photovoltaik-Fassade 90
5.2.4 Verschattung des Gebäudes – Auswirkung auf Photovoltaik-Ertrag und Heizwärmebedarf 92
5.2.5 Vergleich von Anlagentechnik-Konzepten 94
5.2.6 Gebäudeausrichtung 98

5.2.7 Standort und klimatische Bedingungen 100
5.2.8 Einfluss veränderten Nutzerverhaltens 102
5.2.9 Integration des PH+E ins Quartier 105

6 Zusammenfassung und Ausblick 107

7 Literaturverzeichnis 111

Anhang A - Abbildungsverzeichnis 116

Anhang B - Tabellenverzeichnis 119

1 Einleitung

Kaum ein Thema hat die Diskussion in Deutschland in den letzten Jahren so bestimmt wie die Energiewende. Dabei lag der Fokus der öffentlichen Wahrnehmung hauptsächlich auf dem Umbau der Stromversorgung von Atomkraft und fossilen Energieträgern hin zu einer regenerativen Energieversorgung. Ein wichtiger Bereich des Energieverbrauchs in Deutschland wird dabei außer Acht gelassen – der Gebäudesektor. So lag der Verbrauch der Haushalte für Niedertemperaturwärme 2010 mit 740 TWh deutlich höher als der gesamte Nettostromverbrauch aller Abnehmer von 510 TWh (Industrie, Verkehr, Handel/Dienstleistung, Haushalte) [BMWI 2013]. Am Nettostromverbrauch sind die Haushalte mit ca. 140 TWh oder 28 % beteiligt. Somit stellt sich die Frage, wie die Energiewende in den beiden Bereichen Wärme und Strom sinnvoll zusammengeführt werden kann, um die energiepolitischen Ziele zu erreichen.

Zur Lösung dieser Frage wurden in den letzten beiden Jahrzehnten wichtige Entwicklungen angestoßen. So wurde 1992 mit dem ersten Passivhaus eine Entwicklung zu Gebäuden in Gang gesetzt, die höchste Energieeffizienz bei gleichzeitig sehr hohem Wohnkomfort bieten. Durch die Passivhaus-Bauweise kann der Heizwärmebedarf gegenüber Gebäuden nach dem gesetzlich geforderten energetischen Standard (EnEV) um bis zu 80 % reduziert werden. Weiterhin werden auch Effizienzmaßnahmen für die Bereiche Warmwasserbereitung, Wärmeverteilung sowie Hilfs- und Haushaltsstrom angeregt. Durch den Preisverfall der Photovoltaik, ausgelöst durch die Förderung durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG), wurde andererseits auch im deutschen Klima eine nennenswerte Energieproduktion mit Solarstromanlagen wirtschaftlich interessant. Die Kombination beider Ansätze, hocheffizienter Gebäudekonzepte in Anlehnung an den Passivhausstandard und die Photovoltaikanlage auf dem Dach, eröffnete die Möglichkeit, Häuser zu errichten, die in der Jahresbilanz mehr elektrische Energie mit der Sonne erzeugen, als sie insgesamt verbrauchen.

Einige Dutzend dieser Gebäude wurden in den letzten Jahren als Plusenergiehaus, EffizienzhausPlus oder Netto-Nullenergiehaus realisiert. Es zeigte sich, dass bei Einfamilienhäusern der bilanziell erforderliche Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch schon vergleichsweise einfach gelingt. Schwieriger ist die Situation bei Mehrfamilienhäusern. Diese besitzen, bezogen auf ihre Wohnfläche, einen geringeren Anteil an Dachfläche, der für eine Photovoltaiknutzung zur Verfügung steht. Außerdem ist die pro Person zur Verfügung stehende Wohnfläche in einem Mehrfamilienhaus meist geringer als in einem Einfamilienhaus. Dadurch steigt auch der flächenbezogene Strom- und Warmwasserverbrauch an. Diese beiden Faktoren führen dazu, dass im Mehrfamilienhaus mehr Anstrengungen und konsequentere Konzepte erforderlich sind, um einen bilanziellen Ausgleich bei den Energieströmen zu erreichen.

In der vorliegenden Untersuchung werden Gebäude, die in der Jahresbilanz mehr Energie erzeugen, als sie verbrauchen als „Passivhaus mit Energiegewinn“[1] bezeichnet. Dieser Name verdeutlicht dabei die klare Prioritätensetzung, die nach Ansicht der Autoren bei der Planung solcher Gebäude erfolgen sollte: An erster Stelle steht die Maximierung der Energieeffizienz, erst dann folgt die Deckung des verbleibenden Restbedarfs mit regenerativen Energien. Anders als oben beschrieben, beschränken sich die Betrachtungen dabei nicht auf die rein photvoltaische Energieversorgung von Gebäuden. Diese erzeugen im Sommer einen großen Überschuss an elektrischer Energie und speisen ihn in das Stromnetz zu Zeiten ein, wenn durch die bereits bestehende Photovoltaikanlagen teilweise mehr Strom vorhanden sein kann, als benötigt wird. Im Winter wird für die Beheizung des Gebäudes Strom für die Wärmepumpe aus dem öffentlichen Stromnetz entnommen, der zurzeit nur zu ca. 25 % regenerativ erzeugt werden kann. Die Lösung der Frage, wie die regenerative Stromerzeugung abhängig vom Bedarf erfolgt, wird auf den Stromnetzbetreiber verschoben. Dies zeigt die Problematik eines Lösungsansatzes mit nur einem Konzept – hier Photovoltaik und Wärmepumpe. Um die Herausforderungen für den Klimaschutz erfolgreich zu meistern, sind aber unterschiedliche,

[1] Der Begriff „Passivhaus mit Energiegewinn“ wurde in der Planungsphase des Bauvorhabens Cordierstraße 4 in Frankfurt von Folkmer Rasch vom Büro faktor10 in Darmstadt für diese Art von Häusern vorgeschlagen.

sich ergänzende Konzepte erforderlich. Aus diesem Grund werden in diesem Bericht nicht nur die Randbedingungen bei Mehrfamilienhäusern zur Erreichung eines bilanziellen Energieüberschusses dargestellt, sondern verschiedene Strom- und Wärmeerzeugungstechniken neutral nebeneinander betrachtet, da für eine langfristig klimaneutrale Gebäudeversorgung mit Strom und Wärme alle verfügbaren regenerativen Energiequellen sinnvoll kombiniert werden müssen. Ein einziges Konzept alleine reicht nicht aus. Da die optimale Kombination der verschiedenen Konzepte heute aber noch nicht bekannt ist, müssen alle Ansätze parallel weiterverfolgt werden.

Bild 1: Verschiedene Gebäude aus dem Modellvorhaben zum Effizienzhaus Plus des BMVBS, oben links: Köln, oben rechts: Münnerstadt, unten links: Leonberg, unten rechts: Bischofswiesen

Quellen: oben links: Schwörer Haus, oben rechts: Andreas Miller, unten links: Bundesministerium für Verkehr Bauen und Stadtentwicklung, unten rechts: Hans Angerer Niedrigenergiehäuser

Angestoßen wurde die Entwicklung zu Gebäuden mit einem bilanziellen Energieüberschuss durch Pioniere wie Rolf Disch, der ab 2000 erste Konzepte entwickelte und verwirklichte sowie die Erfolge der TU Darmstadt beim Solar Decathlon des amerikanischen Energieministeriums in Washington in den Jahren 2007 und 2009. Im Jahr 2011 startet die Deutsche Energie Agentur (dena) ein Förderprogramm mit dem Titel „Auf dem Weg zum EffizienzhausPlus“, seit dem Jahr 2012 führt das Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Stadtentwicklung (BMVBS) ein Modellvorhaben durch, bei dem über ganz Deutschland verteilt unterschiedliche Ansätze für Gebäude mit bilanziellem Energieüberschuss miteinander verglichen werden. Für dieses Modellvorhaben wurden Kriterien für ein solches EffizienzhausPlus festgelegt (dessen Grundzüge in Kapitel 2 erläutert werden). Bild 1 zeigt vier Gebäude aus dem Modellvorhaben EffizienzhausPlus, die

zum Zeitpunkt der Berichterstellung bereits realisiert waren. Der Schwerpunkt der Projekte liegt im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser. Mehrfamilienhäuser sind nur wenige vertreten. Nahezu alle Projekte verfügen über einen Wärmeschutz, der in etwa dem Passivhausstandard entspricht sowie Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung.

Ein weiterer wichtiger Anstoß für die Überlegungen zum EffizienzhausPlus war die Novellierung der EU-Gebäuderichtlinie im Jahr 2010, die für alle Neubauten in der Europäischen Union spätestens ab 2021 nahezu Null-Energie-Gebäude (nearly zero energy buildings) fordert. Die Herausforderungen, aber auch die Anreizwirkungen durch eine solche perspektivische europaweite Festlegung sind nicht zu unterschätzen.

Durch diese Entwicklungen hat die Beschäftigung mit Gebäuden mit Energieüberschuss in der Jahresbilanz deutlich an Dynamik gewonnen, auch wenn sie bisher noch nicht in die tägliche Baupraxis ausstrahlt. Besonders im Bereich der Mehrfamilienhäuser ist vor allem die Frage, welche Konzepte kombiniert werden müssen, um einen Energieüberschuss zu erreichen, noch wenig erforscht. Dieser Bereich soll mit der nun vorliegenden Untersuchung betrachtet und systematisch aufbereitet werden. Wunsch der Autoren wäre, dass die Ergebnisse Architekten, Bauherren und Gesetzgeber anregen, in den nächsten Jahren verstärkt Passivhäuser mit Energiegewinn zu errichten und so die Dynamik einer Entwicklung hin zu Gebäuden zu beschleunigen, die bei hervorragendem Komfort für die Bewohner extrem energieeffizient sind und gleichzeitig Antworten auf die Fragen des Klimaschutzes und der Energiewende liefern.

Bild 2: Realisiertes Passivhaus mit Energiegewinn in der Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main kurz vor der Fertigstellung des Gebäudes (die PV-Fassade an der Südseite ist auf dem Bild noch nicht montiert)

Dieser Bericht ist Teil eines Vorhabens, das vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung gefördert wurde. Die Förderung des Landes Hessen umfasst zwei Phasen. Die erste Projektphase beinhaltete die wissenschaftliche Begleitung der Planungsphase des Neubauvorhabens Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main als Passivhaus mit Energiegewinn (siehe Bild 2). Dieser Teil ist in einem separaten Teilbericht dokumentiert [Schaede, Großklos 2013] und ist unter www.iwu.de abrufbar.

In dem hiermit vorgelegten Bericht wird nun die zweite Projektphase, die Erarbeitung eines übertragbaren Konzepts für „Passivhäuser mit Energiegewinn“, dokumentiert, die auf den Erfahrungen des Bauvorhabens in der Cordierstraße aufbaut. Allgemeinere Überlegungen zu Definition, Effizienzmaßnahmen und Anlagentechnik werden durch Parameterstudien ergänzt, um die Möglichkeiten und Grenzen von Passivhäusern mit Energiegewinn im Bereich der Mehrfamilienhäuser zu beschreiben. Die Betrachtungen in diesem Bericht

konzentrieren sich auf die Situation von Wohngebäuden als Mehrfamilienhäuser. Einfamilienhäuser, die bereits in etwas größerer Anzahl mit Netto-Energieüberschuss errichtet wurden und Nichtwohngebäude wurden bewusst nicht berücksichtigt.

Die Autoren möchten sich ausdrücklich für die Förderung beim Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung bedanken.

Der eine wartet, dass die Zeit sich wandelt, der andere packt sie kräftig an und handelt.

Dante Alighieri, italienischer Dichter, 1265 - 1321

2 Gebäude mit einem Überschuss in der Jahresenergiebilanz

Bei der Beschäftigung mit Gebäuden, die in der Jahresbilanz einen Energieüberschuss liefern, ist es wichtig, die verschiedenen Definitionen, Bilanzierungsgrenzen und Bilanzierungsverfahren zu kennen, um die Ergebnisse einordnen zu können. Dies gilt auch für das Passivhaus mit Energiegewinn, dessen Anforderungen in diesem Kapitel hergeleitet werden. Die Eckpunkte wurden zu Beginn des Projektes 2011 entwickelt, um diese dann zeitnah bei der praktischen Realisierung des Bauvorhabens in der Cordierstraße in Frankfurt umzusetzen. Es wurde eine Vielzahl von Aspekten berücksichtigt, die in der aktuellen Diskussion um Plusenergiegebäude eine hohe Aktualität besitzen. Im Folgenden wird zuerst auf bestehende Definitionen eingegangen (z. B. das nearly Zero Energy Building, das Netto-Nullenergiehaus und das EffizienzhausPlus), anschließend werden die einzelnen Anforderungen an das Passivhaus mit Energiegewinn diskutiert und schließlich zusammengefasst.

2.1 Bestehende Definitionen für Gebäude mit jahreszeitlichem Ausgleich in der Energiebilanz

Die in diesem Bericht dargestellten Passivhäuser mit Energiegewinn haben viele Ähnlichkeiten zu bisherigen Projekten, die mit den Namen „Nullenergiehäuser“, „Energieplushäuser“, „(nearly)-Zero-Energy-Buildiungs“ (ZEB oder nZEB) oder „EffizienzhausPlus“ bezeichnet werden. Hinter diesen Begriffen steht keine einheitliche Definition, was bedeutet, dass Gebäude mit ähnlicher Zielsetzung trotzdem eine unterschiedliche Energieeffizienz aufweisen können, da sie unter verschiedenen Randbedingungen bilanziert werden und dadurch schwer vergleichbar sind. Im Folgenden werden einige dieser Definitionen vorgestellt:

Frühe Gebäude mit dem Ziel eines Ausgleichs von Bedarf und Erzeugung

Bereits früh mit der Entwicklung von Niedrigenergiehäusern wurde versucht, den Heizwärmebedarf soweit zu reduzieren, dass er rein regenerativ gedeckt werden kann. Schon die ersten Projekte verwendeten dazu unterschiedliche Bilanzgrenzen. Zu nennen ist z. B. das Null(heiz)energiehaus Dörpe von 1989 (vgl. Bild 3 links), das die Heizenergie über eine solarthermische Anlage in Kombination mit einem Langzeitspeicher saisonal bereitstellen sollte. Hier wurde nur der Heizwärmebedarf in den bilanziellen Ausgleich einbezogen.

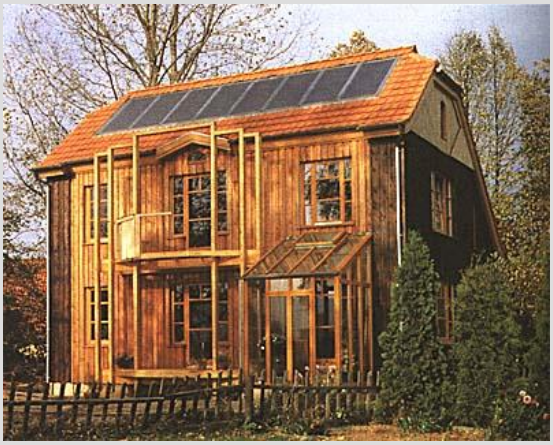


Bild 3: Frühe Gebäude mit dem Ziel „Ausgleich von Bedarf und Erzeugung“; links: Null(heiz)energiehaus Dörpe (1989), rechts: energieautarkes Solarhaus, Freiburg (1992)

Quellen: links: Wikipedia, rechts: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg

Das Energieautarke Solarhaus in Freiburg (vgl. Bild 3 rechts) zeigte 1992 erstmals, dass eine energieautarke Versorgung möglich ist. Hier wurden Wärme sowie Haushalts- und Hilfsstrom unabhängig von Versorgungsnetzen ganzjährig autonom über Solarenergie geliefert. Ein anderes Beispiel ist die zwischen 2000 - 2006 in Freiburg gebaute Plusenergiesiedlung von Rolf Disch, die den gesamten Wärme- und Strombedarf der Gebäude durch die Nutzung optimal ausgerichteter großer Dachflächen mit Photovoltaik in Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung innerhalb der Siedlung erzeugt und in der Jahresbilanz einen primärenergetischen Überschuss erzielt. Dabei wird eine Gutschrift für eingespeisten Strom angerechnet.

EPBD – „Niedrigstenergiegebäude“ (nearly Zero Energy Building – nZEB)

Die EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden [EPBD 2010] legt fest, dass neue Wohngebäude in der Europäischen Union ab 2021 als Niedrigstenergiegebäude errichtet werden müssen ([EPBD 2010] Artikel 9 Nr.1a). Umrissen wird das Niedrigstenergiegebäude in Artikel 2 Nr. 2 als

> *„… ein Gebäude, das eine sehr hohe […] Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil aus erneuerbaren Quellen […] gedeckt werden.“*

Die EPBD fordert zusätzlich nationale Pläne zur Erhöhung der Zahl dieser Niedrigstenergiegebäude und gibt Rahmenbedingungen für Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Neubauten, aber auch von Bestandgebäuden. Die Mitgliedstaaten können eigene Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden bestimmen, die kostenoptimal festgelegt werden sollen. Während die Mindestanforderungen der EPBD an das Bilanzierungsverfahren mit Berücksichtigung von Heizung, Warmwasser, Belüftung, Hilfsstrom und Beleuchtung (nur bei Nichtwohngebäuden) von der heutigen EnEV bereits weitgehend erfüllt werden, ist es den Mitgliedsstaaten möglich weitere Anforderungen festzulegen, die darüber hinausgehen. Insbesondere die Frage, wie niedrig der Energiebedarf liegen muss, ist noch offen. Daher ist noch nicht klar, wie das Niedrigstenergiegebäude in Deutschland und anderen EU-Ländern genau definiert werden wird. Weitere Unklarheiten bestehen z. B. bei der Festlegung der von der EPBD geforderten kostenoptimalen Mindestanforderungen, der Definition der Primärenergiefaktoren für regenerative Energieträger und dem Umgang mit Gutschriften für eingespeisten Strom.

Klimaneutrales Gebäude (Null-Emissionen-Haus)

Das Null-Emissions-Haus (Zero-Emission-House) zielt nicht nur auf den Energiebedarf der Gebäude ab, sondern berücksichtigt über direkte und vorgelagerte CO_2-Emissionen auch die Klimabilanz des Hauses. Somit werden die durch die verwendeten Energieträger entstehenden CO_2-Emissionen bilanziert. Das Null-Emissions-Haus kann wie folgt umrissen werden (vgl. [Großklos et al. 2010]):

Es ist ein Energiespargebäude, das

1. *den Verbrauch von Energie soweit wie möglich vermeidet,*
2. *seinen auf diese Weise minimierten Rest-Energiebedarf möglichst weitgehend aus erneuerbaren Energien deckt und*
3. *schädliche Emissionen, die sich dennoch nicht vermeiden lassen, durch Zusatzmaßnahmen kompensiert*

Die Bilanzgrenze entspricht der EnEV, d. h. bei Wohngebäuden wird die Wärme für Heizung, Warmwasser, Verteilung- und Speicherung sowie der Hilfsstrom bilanziert.

Netto-Nullenergiehaus

Die Definition des Netto-Nullenergiehauses nach [Voss 2013] wird anhand des Primärenergiebedarfs geführt. Enthalten sind in der Bilanzierung die Energieverbräuche für Heizung, Warmwasser, Hilfsenergie, Beleuchtung und alle Geräte (Haushaltsstrom). Die Bilanz wird über den Zeitraum eines Jahres aufgestellt. Bild 4 zeigt die grafische Darstellung dieser Bilanz, deren Vorteil ist, dass der immer verbleibende (Rest-)Energiebedarf und die Anrechnung von Gutschriften sauber getrennt sind, so dass sowohl die Effizienz des Gebäudes als auch die Höhe der Gutschriften getrennt dargestellt werden. Liegt der Primärenergiebedarf nach Anrechnung der Einspeisegutschrift auf oder über der Winkelhalbierenden von Energiebedarf und -erzeugung liegt, so handelt es sich um ein Netto-Null- oder Plusenergiegebäude.

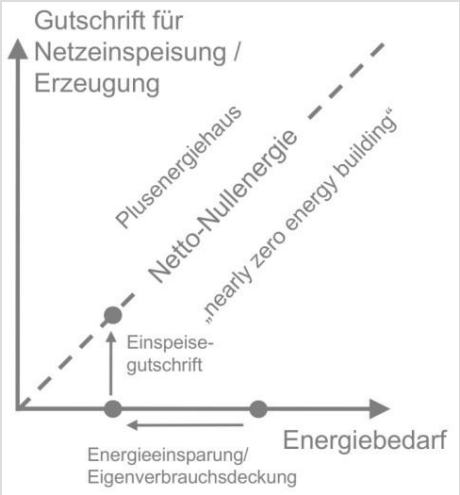


Bild 4: Bilanzierung des Netto-Null-Energiehauses nach [Voss 2013]

Aktivhaus

Das Aktivhaus wurde innerhalb des Netzwerkes „Active House Alliance" der internationalen Baubranche entwickelt. Die Bilanzierung der Gebäude erfolgt anhand der national gültigen Regelwerke. Für Deutschland wird das Aktivhaus nach EnEV mit etwas erweitertem Bilanzraum anhand der Kenngröße des Jahresprimärenergiebedarfs bilanziert (vgl. [Hegger et al.2013]): *„Dieser setzt sich aus dem Energiebedarf für den Gebäudebetrieb (Heizen, Kühlen, Lüften, Warmwasseraufbereitung) und für die Haushaltsgeräte sowie der Gutschrift selbstgenutzter, regenerativ erzeugter Energien zusammen."* Als regenerative Energiequellen kommen sowohl am Grundstück erzeugte oder auch durch ein öffentliches Netz bezogene Energien in Frage. Die Energiekennwerte Endenergie, Primärenergie und der Anteil der auf dem Grundstück produzierten Energie werden bewertet und 4 Klassen zugeordnet. Als weitere Randbedingungen wird eine ökonomisch sinnvolle Auswahl der technischen Anlagen, eine Integration in das architektonische Erscheinungsbild, Nutzerfreundlichkeit eines Gebäudemanagementsystems sowie eine Bewertung von Parametern zu Licht und Aussicht, Thermischer Umgebung, Raumluftqualität und Lärm sowie Akustik genannt. Es wird eine Ökobilanzierung mit Betrachtungszeitraum von 75 Jahren durchgeführt.

Bild 5: LichtAktiv Haus (Bildquelle: www.velux.de)

EffizienzhausPlus: Definition des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Die Definition des EffizienzhausPlus des BMVBS (vgl. [BMVBS 2012]) orientiert sich an den Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV). Der Nachweis für den Energieüberschuss ist nach EnEV in Kombination mit der DIN V 18599 zu führen. Erweitert wird diese Bilanz um die Einbeziehung des Energiebedarfs für Beleuchtung und Haushaltsgeräte mit einer Pauschale von 20 kWh/(m²a) sowie die in der Höhe nicht begrenzte Gutschrift für am Gebäude erzeugte elektrische Energie. Wichtigste Anforderung ist hier, einen negativen End- und Primärenergiebedarf, bzw. eine über den Bedarf hinausgehende Erzeugung zu erreichen (entspricht Überschuss). Bilanzgrenze ist das Grundstück auf dem das Haus errichtet ist. Es gilt die Nebenanforderung, dass Gebäude mit Haushaltsgeräten der höchsten Effizienzlabel auszustatten sind. Die Bilanz wird analog der EnEV als Monatsbilanz geführt, der Zielwert des negativen End- und Primärenergiebedarfes muss jedoch nur in der Jahresbilanz erreicht werden.

EffizienzhausPlus: Definition der dena

Die Deutsche Energie-Agentur (dena) hat bereits 2011 unter dem Titel „Auf dem Weg zum EffizienzhausPlus“ Modellvorhaben zu besonders energieeffizienten Neubauten und Sanierungen mit KfW-Mitteln gefördert. Dieses EffizienzhausPlus unterscheidet sich jedoch wesentlich von der zuvor dargestellten Definition des EffizienzhausPlus des BMVBS: Während das BMVBS die Anforderungen stellt, nach Verrechnung des erzeugten Stromes (über den Bilanzrahmen der EnEV hinaus) einen negativen End- und Primärenergiebedarf des Gebäudes zu erreichen, orientierte sich die (zeitlich früher erstellte) Definition der dena an den Förderkriterien der KfW und blieb so im Bilanzrahmen der EnEV. Außerdem wurden mit einem Maximalwert für H_T‘ Mindestanforderungen an die Effizienz der Gebäudehülle gestellt. Nach den Randbedingungen der dena müssen die Gebäude keinen Energieüberschuss erzeugen, sondern die von der KfW geförderten Standards für ein Effizienzhaus 40 bei Neubauten und die für ein Effizienzhaus 55 bei Sanierungen deutlich unterschreiten sowie einen wesentlich geringeren End- und Primärenergiebedarf aufweisen (vgl. [dena 2011]).

Außerhalb Deutschlands: Minergie A (Schweiz)

Der Minergie-A Standard gibt als Zielvorgabe Nullenergie für Wärme, Kälte und Lüftung vor, dieser Energiebedarf muss lokal durch regenerative Energien gedeckt werden. Nebenanforderung ist, dass maximal 50 % des Energiebedarfs durch Verbrennung von Biomasse gedeckt werden (vgl. [Minergie 2012]). Die Bilanzgrenze umfasst den kompletten Wärmebedarf sowie Hilfsstrom. Weitere Anforderungen bestehen hinsichtlich der energetischen Qualität des Gebäudes. Hier wird die Einhaltung des Minergie-Standards hinsichtlich der Grenzwerte für Wärmebedarf, einzelne Bauteile und Luftdichtheit gefordert. Darüber hinaus muss das Gebäude mit besten Geräten für Haushalt, Büro und Beleuchtung ausgestattet werden und darf einen maximalen Energiebedarf für Erstellung und Rückbau des Hauses von 50 kWh/(m²a) aufweisen.

2.2 Bestandteile der Definition von Gebäudestandards

Zentrale Fragestellungen, die sich für die Definition eines Gebäudes mit Energiegewinn ergeben, sind in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Bilanzierungsfragen für Gebäude mit Energiegewinn

Bilanzsystem:	Erfolgt die Bilanzierung der Energie auf Grundlage von Kennwerten zur Primärenergie, Endenergie, Emissionen, Exergie oder Kosten?
Bilanzgrenzen:	**Energiebedarf:** Wird nur der Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser sowie der Hilfsenergiebedarf bilanziert oder der gesamte Energiebedarf einschließlich des individuellen Strombedarfs des Gebäudenutzers? Wird gegebenenfalls sogar Energie für Mobilität oder die Erstellung und den Rückbau des Gebäudes mit betrachtet? **Energieerzeugung:** Wird dem Gebäude lediglich die solar erzeugte Energie zugerechnet, die durch ein BHKW erzeugte Energie oder sogar der Bezug von Ökostrom? Kann zur Kompensation über Gutschriften zwischen verschiedenen Energieträgern gewechselt werden?
Bilanzperiode:	Über welchen Bezugszeitraum sollte die Bilanz ausgeglichen sein? Monatlich, jährlich, über die Lebensdauer des Gebäudes?
Energiequelle:	Sollten Gebäude mit Energiegewinn ausschließlich durch regenerative Energieträger versorgt werden oder ist auch ein Einsatz fossiler Energieträger denkbar?
Netzkopplung:	Handelt es sich um ein energieautarkes Gebäude oder ein Gebäude das netzgekoppelt ist und das elektrische Netz teilweise als „Stromspeicher“ nutzt und somit nur bilanziell einen Energiegewinn erzielt?
Zusätzliche Randbedingungen:	Welcher energetische Gebäudestandard sollte einem Gebäude mit Energiegewinn zugrunde gelegt werden? Wie viel Biomasse darf in einem solchen Gebäude verwendet werden? Sollte der zeitliche Ausgleich von Energiebedarf und -erzeugung durch das elektrische Netz begrenzt werden?

Die aufgeführten Fragestellungen werden im Folgenden diskutiert und schließlich Anforderungen für das hier dargestellte Passivhaus mit Energiegewinn abgeleitet.

Bilanzsystem

Erfolgt die Bilanzierung der Energie auf Grundlage von Kennwerten zur Primärenergie, Endenergie, Emissionen, Exergie oder Kosten?

Die Bilanzierung erfolgt bei normalen Gebäuden wie auch bei Gebäuden mit bilanziellem Energieüberschuss bisher meist auf Grundlage der Primärenergie oder der Emissionen. Die Bewertung auf Basis von Endenergie ist für den Fall, dass ein Gebäude verschiedene Energieträger nutzt, schwierig, diese werden erst durch Primärenergiefaktoren vergleichbar. Wichtig hierfür ist jedoch die verlässliche Definition von Primärenergie- und/oder Emissionsfaktoren verschiedener Energien. Eine Ausweisung gleich mehrerer Kennzahlen zusätzlich zur Primärenergie (z. B. Endenergie oder Öko-Indikatoren wie das Versauerungspotenzial) erhöht die Transparenz, erschwert jedoch die Bewertung, wenn die einzelnen Kennzahlen unterschiedliche Tendenzen aufweisen. Da ein wichtiger, aber nicht alleiniger Antrieb zur Weiterentwicklung hin

zu Gebäuden mit Energieüberschuss die Reduktion der Treibhausgasemissionen ist, sollten auch diese bilanziert werden. Je nach eingesetztem Energieträger kann die THG-Bilanz im Ergebnis deutlich von der Primärenergiebilanz abweichen. Weitere Bilanzierungsgrundlagen wie z. B. Exergie oder Kosten erscheinen nicht zielführend, da der Begriff Exergie für Planer und die Öffentlichkeit eher unverständlich ist und Kosten zu stark zeitlich variieren und politisch beeinflussbar sind.

Da die primärenergetische Bilanzierung die beste Vergleichbarkeit zu bestehenden Standards in Deutschland (z. B. Niedrigstenergiehaus und Passivhaus) bietet, wird dieser Bilanzierungsansatz weiter verfolgt. Die primärenergetische Bewertung wirft jedoch in Hinsicht auf die Bilanzierung als Gebäude mit Energiegewinn neue Fragen auf: Ist es erlaubt zwischen Bezug und Einspeisung den Energieträger zu wechseln, z. B. Biogas oder Rapsöl zu beziehen und Strom einzuspeisen (siehe unter „Energieerzeugung“)?

Primärenergiefaktoren sind nicht konstant, insbesondere der Primärenergiefaktor für Strom sinkt in Deutschland rapide durch den immer größer werdenden Anteil regenerativen Stroms. Ein Gebäude, das mit aktuellen Primärenergiefaktoren in der Planung einen Überschuss erzielt, könnte im Laufe der Nutzungsdauer aus primärenergetischer Sicht vom Überschuss zum Bedarf wechseln, da die Höhe der Gutschriften sinkt. Diese Fragestellung ist jedoch aus Sicht der Autoren unproblematisch, da die Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs in Deutschland betrachtet werden sollte. Die Erreichung eines Energieüberschusses für ein einzelnes Gebäude unter Berücksichtigung von aktuellen Primärenergiefaktoren stellt ein sehr ambitioniertes Ziel dar, das es erst einmal zu erreichen gilt und das einen Schritt in Richtung Optimierung des Gesamtsystems darstellen kann. Aus diesem Grund kann für die Bilanzierung der Primärenergiefaktor aus der Planungsphase verwendet werden.

Bilanzgrenzen

Energiebedarf: Wird nur der Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser sowie der Hilfsenergiebedarf bilanziert oder der gesamte Energiebedarf einschließlich des individuellen Strombedarfs des Gebäudenutzers? Wird gegebenenfalls sogar Energie für Mobilität oder die Erstellung und den Rückbau des Gebäudes mit betrachtet?

Bei bestehenden Projekten, die den Anspruch Null- oder Plusenergiegebäude erheben, wird meist der Wärme- und Hilfsenergiebedarf bilanziert, teilweise auch der Energiebedarf für die Beleuchtung, da dies in der EPBD, bzw. DIN V 18599 gefordert wird. Wird jedoch von Gebäuden mit Energiegewinn gesprochen, impliziert dies aus Sicht der Autoren den gesamten Betriebsenergiebedarf eines Gebäudes, inklusive dem von der Nutzung abhängigen Strombedarf. Diese ganzheitliche Betrachtung des Gebäudes wird notwendig sein, um die von der Bundesregierung gesetzten Klimaschutzziele erreichen zu können.

Langfristig gesehen könnte zusätzlich der Energiebedarf für die Erstellung und den Rückbau der Gebäude sowie für Mobilität in die Betrachtung mit einfließen. Diese Bereiche sind jedoch nur bedingt dem Gebäude zuzurechnen und ihre Bilanzierung bringt in der Praxis noch diverse Probleme mit sich. So ist die Bilanzierung des Herstellungsenergieaufwandes aktuell noch sehr aufwändig. Meist ergibt sich abhängig von den verwendeten Baustoffen ein Wert zwischen 20-50 kWh/(m²a) bei einer Nutzungsdauer von 60 Jahren (vgl. [Voss et al. 2011(2)]), der jährlich kompensiert werden müsste. Dies kann durch die Energieerzeugung am Gebäude aktuell meist noch nicht geleistet werden. Schwierig ist auch die Einbeziehung des Energiebedarfs für Verkehr, dieser ist sehr stark abhängig von externen Faktoren wie dem Standort des Gebäudes, der Lebenssituation der Bewohner, der Politik (Nahverkehr, Kraftstoffsteuern) sowie der Automobilindustrie (Verbrauchsreduktion, Preispolitik), um nur wenige zu nennen.

Bild 6 stellt verschiedene Bilanzgrenzen dar.

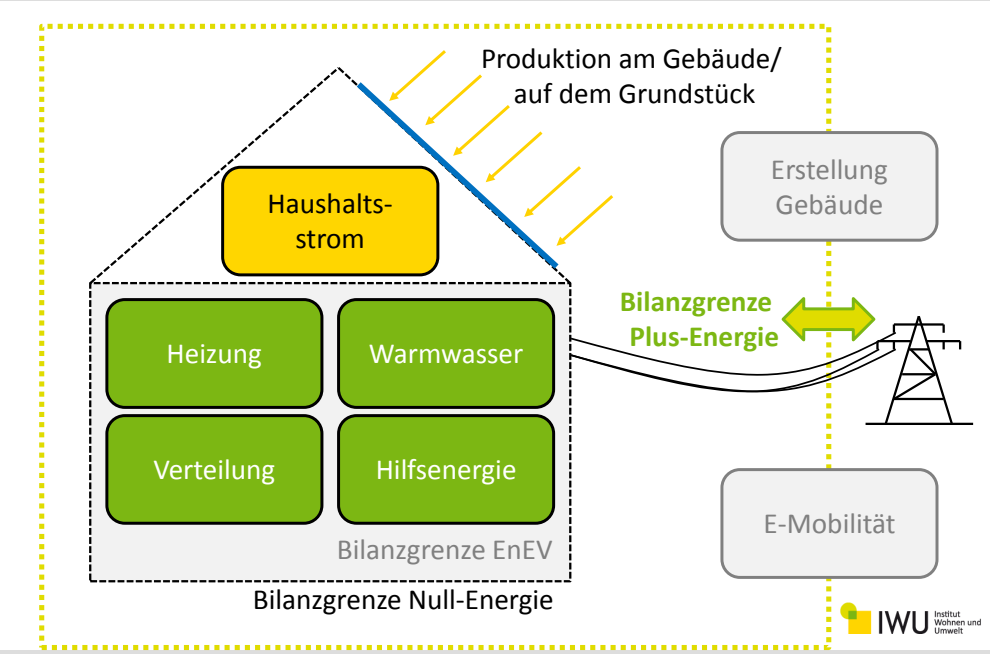


Bild 6: Bilanzgrenzen nach EnEV, Null-Energie und Plusenergie

Energieerzeugung: Wird dem Gebäude lediglich die solar erzeugte Energie zugerechnet, die durch ein BHKW erzeugte Energie oder sogar der Bezug von Ökostrom? Kann zur Kompensation über Gutschriften zwischen verschiedenen Energieträgern gewechselt werden?

Verbreitete Konzepte für Gebäude mit Überschuss in der Jahresenergiebilanz nutzen große Solaranlagen, meist ausschließlich **Photovoltaik** in Verbindung mit einer **Wärmepumpe**. Dies sollte jedoch aufgrund der starken Beanspruchung des Stromnetzes mit Erzeugungsspitzen im Sommer und hohem Bezug im Winter (Nutzung des elektrischen Netzes als „saisonaler Speicher“) als alleiniges Konzept hinterfragt werden. Auch sollte eine primärenergetische Bewertung von Photovoltaik-Anlagen vorgenommen werden, da aufgrund der stark sinkenden Preise für Photovoltaik-Module der Trend zu immer größeren Photovoltaik-Flächen, auch mit ungünstigen Ausrichtungen besteht. Bisher wird selbst erzeugter PV-Strom mit einem Primärenergiefaktor von Null bewertet, was eine Abwägung der Effizienz verhindert.

Zusätzlich bietet der Ansatz, die gesamte Energieversorgung eines Gebäudes über elektrische Energie durch Photovoltaikanlagen zu decken, für große Wohngebäude, aufgrund der geringeren zur Energieerzeugung zur Verfügung stehenden (Dach-)Fläche pro m² Wohnfläche, nur unter bestimmten Rahmenbedingungen die Möglichkeit, das Ziel des Energiegewinnes zu erreichen. Wichtige Randbedingungen sind z. B. die optimale Ausrichtung des Gebäudes zur Solarenergienutzung oder die Gestaltungsfreiheit hinsichtlich der Ausrichtung und Größe der Dachfläche, um dadurch die solare Energieerzeugung zu erhöhen. Neubauten, die das Ziel „Plusenergie“ rein auf Basis photovoltaischer Energieerzeugung erreichen, haben daher oft sehr große, über das eigentliche Gebäude überstehende Dachflächen, und die Neigung der zur Energieerzeugung genutzten (Dach- und teilweise auch Wand-)Flächen wird häufig der optimalen Ausrichtung für die Erzeugung angepasst.

Bei Bestandsgebäuden oder Neubauten in bestehenden Siedlungen können Größe und Ausrichtung der (Dach und Wand-)Flächen meist nicht für die solare Erzeugung optimiert werden, so dass eine Photovoltaik-Anlage alleine nicht ausreicht. Hier ist daher eine zusätzliche Quelle zur Energieerzeugung notwendig. Der Einsatz von **Blockheizkraftwerken** unter Verwendung regenerativer Brennstoffe bietet sich in diesem Fall an, da der regenerative Brennstoff hier mit einer sehr hohen Effizienz von 90 %, bei Brennwertnutzung sogar 100 % bezogen auf den Heizwert H_i, genutzt werden kann. Dies ist deutlich effizienter als die Nutzung dieser Brennstoffe ausschließlich zu Heizzwecken und Bezug des Reststroms aus konventionellen Kraftwerken. Weiterhin wird das elektrische Netz deutlich weniger für den Ausgleich zwischen Sommer und Winter genutzt, da einerseits im Gebäude auch im Winter elektrische Energie produziert wird und andererseits im Vergleich zu Wärmepumpen-Konzepten keine elektrische Energie für die Bereitstellung von Wärme benötigt wird. Daher sollte die Energieerzeugung durch Blockheizkraftwerke unter Beachtung der Nebenanforderung des nachhaltigen, geringstmöglichen Einsatzes von Biomasse (siehe Abschnitt „zusätzliche Randbedingungen“) für Gebäude mit Energiegewinn einbezogen werden. Generell gilt es, beide Konzepte, sowohl die Kombination von PV und Wärmepumpe, als auch von BHKW und PV sinnvoll zu kombinieren. Mit nur einem der beiden Konzepte wird die Energieversorgung der Zukunft kaum funktionieren.

Auf diese Weise sind Gebäude mit Energiegewinn in der Breite realisierbar, große Gebäudebestände und ganze Quartiere im Bestand können auf ein sehr hochwertiges energetisches Niveau modernisiert werden. Zusätzlich reduziert sich der Einfluss dieser Gebäudebestände auf das elektrische Netz und die Energieerzeugungsstruktur. Dies scheint für die Erreichung der Klimaschutzziele notwendig. Wird die von Blockheizkraftwerken erzeugte Energie (Strom und Wärme) als Energieerzeugung des Gebäudes für die Bilanz mit Energiegewinn einbezogen, impliziert dies, dass für die Anrechnung der Gutschriften[2] ein Wechsel zwischen dem Energieträger notwendig ist. Eine Bewertung lässt sich in diesem Fall am besten anhand von Primärenergiefaktoren und/oder CO_2-Emissionen vornehmen. Die Verwendung von Gutschriften über (Emissions-) Zertifikate, die in keinem Zusammenhang mit dem konkreten Gebäude stehen, dürfen nicht für den Energieüberschuss angerechnet werden. Gleiches gilt für den Zukauf von Ökostrom, wenn die Anlagen nicht dem Gebäude zugerechnet werden können.

Als **räumliche Bilanzgrenze** kommen verschiedene Kategorien in Betracht: Das Gebäude selbst, das gesamte zum Gebäude gehörende Grundstück, die Siedlung, Städte, Bundesländer oder noch größere räumliche Einheiten. Letzteres würde bedeuten, dass ein Gebäude sogar auch unter Anrechnung von z. B. elektrischer Energie aus Wasser- oder Windkraft aus sehr entfernten Regionen bilanziell einen Ausgleich erreichen könnte. Dies scheint für die Definition von Gebäuden mit Energiegewinn jedoch nicht zielführend, da das Gebäude in diesem Fall selbst nur bedingt zum Energiegewinn beiträgt und im Zuge der Errichtung/Modernisierung des Gebäudes vermutlich keine zusätzlichen regenerativen Energieerzeugungsanlagen installiert werden würden. Eine genaue Zuordnung einzelner Energieerzeugungsanlagen zum Gebäude ist aber aus Sicht der Autoren ein sehr wichtiger Aspekt, um die erzeugte Energie dem Gebäude zurechnen zu können und eine Energiebilanz des Einzelgebäudes erstellen zu können. Diese Frage stellt sich z. B. auch bei der Nahwärmeversorgung über ein Blockheizkraftwerk, das gleich mehrere Gebäude versorgt. Kann diese Energieerzeugung dem Gebäude zugerechnet werden? Wie wird die dort erzeugte elektrische Energie bilanziert?

[2] Gebäude mit Energieüberschuss nutzen zeitliche Gutschriften (das Netz als „saisonaler“ Speicher) oder zwischen Energieträgern (Bezug eines Energieträgers gegen Einspeisung von Elektrizität), um eigenen Bezug aus dem Netz, Aufwand aus vorgelagerten Prozessen oder der Gebäudeerrichtung zu kompensieren. Dieser Ansatz ist nicht unumstritten, insbesondere bei KWK ist eine Abkehr von der Allokation über Gutschriften in der Diskussion (Wärmeerzeugung wird mit Hilfe der Stromeinspeisung „gutgerechnet“). Generell ist festzustellen, dass außer bei energieautarken Gebäuden ohne Gutschriften kein bilanzieller Energieüberschuss möglich ist. Aus diesem Grund wird hier an der eingeführten Betrachtungsweise der Nutzung von Gutschriften unter der Voraussetzung festgehalten, dass die Gebäude die in diesem Bericht beschriebene sehr hohe Energieeffizienz aufweisen.

Ziel ist es, dass das Konzept „Passivhaus mit Energiegewinn“ mittelfristig in der breiten Masse bei Neubauten und möglichst auch bei Bestandsgebäuden angewendet wird. In der Praxis hat sich gezeigt, dass es einerseits teilweise schwierig ist, in bestehenden Siedlungen, beschränkt auf das Grundstück eines Gebäudes oder nur das Gebäude selbst, genügend (hauptsächlich solare) Energieerzeugung, zu installieren. Unter energetischer aber auch betriebswirtschaftlicher Betrachtung ist es geboten die benötigte Energie an möglichst geeigneten Standorten zu erzeugen und Effizienzpotenziale nicht nur des einzelnen Grundstücks zu nutzen.

Die beiden Anforderungen, einerseits die Energieerzeugungsanlagen dem einzelnen Gebäude zurechnen zu können, andererseits das Effizienzpotenzial möglichst geeigneter Standorte zu nutzen, werden daher zu folgenden Anforderungen an die räumliche Bilanzierung gestellt:

- Als räumliche Grenze für die maximale Entfernung zwischen Energieerzeugungsanlage und Gebäude wird die Siedlung/das Quartier festgelegt.
- Die Energieerzeugungsanlagen müssen dem entsprechenden Gebäude ganz oder teilweise zugeordnet werden (fester Anteil an der Gesamtanlage).
- Bei der Gebäudebilanz wird nur die Energieerzeugung einbezogen, die von den zugeordneten Anlagen erzeugt wird. Bei Blockheizkraftwerden wird daher der Teil des Stromes, der aufgrund der benötigten Wärme des Gebäudes anfällt bilanziert. Dem Standort, auf dem die Energie erzeugt wird, kann daher nicht seine gesamte Wärme- und Stromerzeugung bilanziell zugeordnet, bzw. gutgeschrieben werden, sondern nur der Anteil, der im jeweiligen Gebäude verbraucht wird.

Für die Definition des Gebäudes mit Energiegewinn beziehen die Autoren daher den gesamten Energiebedarf des Gebäudes an Wärme und elektrischer Energie mit ein. Dieser wird durch verschiedene Energieerzeugungsanlagen im und am Gebäude und ggf. innerhalb der Siedlung/des Quartiers gedeckt. Der entstehende Energiegewinn/-überschuss kann zur Kompensation des Herstellungsenergieaufwandes des Gebäudes, der Anlagentechnik oder auch für Elektromobilität verwendet werden. Diese sind jedoch nicht in dem bilanzierten Energiebedarf enthalten.

Bilanzperiode

Über welchen Bezugszeitraum sollte die Bilanz ausgeglichen sein? Monatlich, jährlich, über die Lebensdauer des Gebäudes?

Je kürzer die Bilanzperiode gewählt wird, umso schwieriger gestaltet sich die Zielerreichung. Der gängige Ansatz ist hier die jährliche Bilanzierung. Gebäude die das elektrische Netz als „saisonalen Energiespeicher“ nutzen, können auf diesem Weg eine ausgeglichene Energiebilanz aufweisen. Es gibt jedoch auch Ansätze, die eine höher aufgelöste zeitliche Differenzierung betrachten, so z. B. die von [Voss et al. 2011] definierte Deckungsrate, die einen Indikator für die zeitliche Übereinstimmung von Bedarf und Erzeugung in Abhängigkeit des gewählten Zeitintervalls darstellt. Je kleiner das Zeitintervall gewählt wird, desto weiter nähert sich das Gebäude der Energieautarkie an (siehe entsprechender Abschnitt unten).

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

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

Langfristig ist eine detailliertere Betrachtung als ein gesamtes Jahr notwendig. Wird zur Erreichung der Klimaschutzziele eine immer größere Anzahl an Gebäuden auf dem Niveau eines Plusenergiehauses modernisiert, werden die dadurch entstehenden Auswirkungen auf die elektrischen Netze und den benötigten Kraftwerkspark immer größer. Dieser Aspekt wird heutzutage noch vernachlässigt, wird aber in Zukunft

immer mehr an Bedeutung gewinnen. Inwiefern dieser Ausgleich zwischen Bezug und Bedarf dann jedoch vom einzelnen Gebäude geleistet werden muss oder ob dies aufgrund der Erzeugungsstruktur teilweise effizienter vom elektrischen Netz ausgeglichen werden kann, ist aktuell schwer absehbar. Dies muss in einem größeren Zusammenhang betrachtet werden, da hier das Zusammenspiel der meist genutzten Wärmeerzeugungstechnik im Gebäude (z. B. Wärmepumpen und KWK) und die regenerative Energieerzeugung, insbesondere Photovoltaik und Windkraft eine wesentliche Rolle spielen.

Bis solche Erkenntnisse vorliegen, wird für das Passivhaus mit Energiegewinn vorerst der Ansatz des bilanziellen Ausgleichs von Bedarf und Erzeugung über ein Jahr gewählt.

Energiequelle

Sollten Gebäude mit Energiegewinn ausschließlich durch regenerative Energieträger versorgt werden, oder ist auch ein Einsatz fossiler Energieträgern denkbar?

Die meisten bestehenden Definitionen von Gebäuden mit Energiegewinn nennen den Einsatz regenerativer Energien als wichtigen Bestandteil des Konzeptes. Generell gilt, dass der Verbrauch von fossilen Energieträgern zwar durch Gutschriften rechnerisch ausgeglichen werden könnte, es liegt jedoch ein physischer Verbrauch von nicht reproduzierbaren Energieträgern vor. Daher wird der Einsatz fossiler Energieträger für das Ziel der Erreichung eines Energiegewinnes als ausgeschlossen angesehen. Da der Einsatz fossiler Energieträger durch anderweitige Energieerzeugung am Gebäude, meist durch Photovoltaik, kompensiert werden müsste, kann mit steigender Gebäudegröße aufgrund der geringer werdenden anteilig zur Verfügung stehenden (Dach-)Fläche pro m² Nutzfläche für die solare Energieerzeugung ein Energiegewinn bei z. B. Mehrfamilienhäusern ohnehin nicht mehr erreicht werden.

Gebäude mit Energiegewinn sollten daher immer ausschließlich regenerative Energien nutzen.

Netzkopplung

Handelt es sich um ein energieautarkes Gebäude, oder ein Gebäude das netzgekoppelt ist und das elektrische Netz teilweise als „Stromspeicher“ nutzt und somit nur bilanziell einen Energiegewinn erzielt?

Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob ein Gebäude an ein Energienetz (Strom, Wärme) angeschlossen ist oder die benötigte Energie vollständig alleine erzeugt. Ein energieautarkes Gebäude versorgt sich zu jedem Zeitpunkt ohne Unterstützung eines leitungsgebundenen Netzes selbst. Dazu werden die Anlagen zur Energieerzeugung überdimensioniert, um die gesamte Leistung bereitstellen zu können. Zusätzlich müssen größere Energiespeicher vorhanden sein, die die wichtige Aufgabe des zeitlichen Ausgleichs zwischen Energieverbrauch und Energieerzeugung übernehmen. Die Kosten für die Energiespeicherung liegen aber sehr hoch, so dass dieser Ansatz in Gebieten, in denen ein Stromnetz zur Verfügung steht, unwirtschaftlich ist.

Ist Energieautarkie nicht eines der wesentlichen Projektziele, ist es daher zielführend, das Gebäude an das Netz (elektrisch oder gegebenenfalls auch ein Wärmenetz) zu koppeln, um die Energie- und Kosteneffizienz am Gebäude zu erhöhen. Auf der anderen Seite ist zu beachten, dass durch die Netznutzung die zuvor beschriebene Problematik – die Energie genau zu dem Zeitpunkt zu erzeugen, in dem sie benötigt wird – auf den Energieversorger verlagert wird. Ob die Effizienz in der Erzeugung und Verteilung durch den Energieversorger jedoch höher ist, ist fraglich, insbesondere wenn durch angebundene Gebäude Lastspitzen entstehen, die einen Ausbau des Netzes und Bereithaltung zusätzlicher Spitzenlastkraftwerke fordern. Die Politik greift das Thema der kurzfristigen Lastspitzen nun teilweise auf, indem ein Förderprogramm für elektrische Energiespeicher in Kombination mit Photovoltaikanlagen aufgelegt wurde (vgl. [KfW 2013]) mit dem Ziel, diese Lastspitzen zu verringern. Beim gegenwärtigen Umfang des Förderprogrammes kann jedoch kurz- und mittelfristig kaum eine Netzentlastung dadurch erreicht werden.

Die Autoren sehen daher das Ziel darin, eine möglichst gleichmäßige Erzeugung und Nutzung im Gebäude zu erreichen. Lastspitzen (Einspeisung und Bezug) sollten möglichst weit reduziert werden und Gebäude sollten so optimiert werden, dass das elektrische Netz nicht zu stark als saisonaler Speicher genutzt wird. Diese Fragestellung wird unabhängig von Plusenergiegebäuden insbesondere mit dem zunehmenden Trend der Nutzung elektrischer Energie (z. B. in Wärmepumpen) zur Beheizung und Warmwasserbereitung immer wichtiger und in Zukunft verstärkt diskutiert werden. Zum Glätten kurzfristiger Lastspitzen empfiehlt sich der Einsatz eines elektrischen Energiespeichers, der zum gegenwärtigen Zeitpunkt aber nicht als zwingender Bestandteil einen Gebäudes mit bilanziellem Energieüberschuss angesehen werden kann, da zentrale oder semizentrale Energiespeicher die effizientere Lösungen darstellen.

Für die Bilanzierung bedeutet eine Netzkopplung des Gebäudes, dass bezogene Energie aus dem Netz als Energiebedarf und in das Netz eigespeiste Energie als Gutschrift bilanziert wird. Die Anrechnung von Gutschriften wird daher durch die Netzkopplung notwendig.

Zusätzliche Randbedingungen

Welcher energetische Gebäudestandard sollte einem Gebäude mit Energiegewinn zugrunde gelegt werden?
Wie viel Biomasse darf in einem solchen Gebäude verwendet werden?
Sollte der zeitliche Ausgleich von Energiebedarf und -erzeugung durch das elektrische Netz begrenzt werden?

Grundlage eines Gebäudes mit Energiegewinn sollte ein möglichst **energieeffizienter Gebäudestandard** hinsichtlich des Heizwärme-, Warmwasser-, Hilfs- und Haushaltsstrombedarfs sein, da einerseits durch die Reduzierung des Energiebedarfs das Ziel des Energiegewinns leichter zu erreichen ist, andererseits generell weniger Kompensation durch Gutschriften erfolgen muss. Bei Bestandsgebäuden gibt es aber viele Fälle, bei denen der Energiebedarf nicht ganz auf Passivhaus-Standard reduziert werden kann, z. B. wegen Dämmrestriktionen durch denkmalgeschützte Fassaden oder nicht zu behebende Wärmebrücken im Bestand. Für diese müssen dann angepasste Konzepte, z. B. durch größtmögliche Energieeinsparung abhängig von den jeweiligen Möglichkeiten des Gebäudes entwickelt werden.

Für Neubauten wird der Passivhausstandard als Grundlage des Gebäudes mit Energiegewinn gewählt, wesentliches Kriterium ist daher die Beschränkung des Heizwärmebedarfs auf 15 kWh/(m²a) bei Bilanzierung mit dem Passivhausprojektierungspaket (PHPP). Da in Bestandsgebäuden der Passivhausstandard zwar bei günstigen Randbedingungen zu erreichen ist (vgl. [Großklos 2011]; [Kaufmann et al. 2009]), dies jedoch nicht immer möglich ist, wird für Bestandsgebäude durch die Modernisierung mit Passivhauskomponenten ein möglichst hoher energetischer Standard des Gebäudes angestrebt. Hier bietet es sich an, die Zertifizierungskriterien des EnerPHit-Standards des Passivhaus Instituts (vgl. [PHI 2013]) anzuwenden. Wesentliches Kriterium ist hier die Begrenzung des Heizwärmebedarfs auf 25 kWh/(m²a), falls dies nicht erreicht werden kann, werden alle energetisch relevanten Bauteile nach Passivhauskriterien bewertet. Grundsätzlich ist hier festzustellen, dass auch langfristig nicht alle Bestandsgebäude einen bilanziellen Energieüberschuss erreichen werden.

Neben der Heizwärme sind bei Gebäuden auch der Energiebedarf für Warmwasserbereitung, Wärmeverteilung sowie Hilfs- und Haushaltsstrom zu begrenzen. Bei der Wärmeverteilung sollte, wenn auf diese nicht durch dezentrale Systeme verzichtet werden kann, zumindest ein Dämmstandard umgesetzt werden, der dem Doppelten der Anforderungen der EnEV 2009 entspricht. Bei der Warmwasserbereitung und auch

beim Haushaltsstrom stellt sich jedoch einerseits die Schwierigkeit, dass der Energiebedarf stark von der Belegungsdichte abhängt und qualifizierte, personenbezogene Kennwerte bisher kaum vorliegen. Andererseits liefert selbst eine so detaillierte Bilanzierung des Haushaltsstromverbrauchs, wie sie im PHPP möglich ist, keinerlei Gewähr (z. B. durch baulichen Vorkehrungen), dass die Mieter im Mehrfamilienhaus entsprechende Geräte anschaffen und nutzen. Somit können für die Bereiche Warmwasser und Haushaltsstrom bisher keine Grenzwerte wissenschaftlich festgelegt werden. Hier ist eine Ausstattung der Wohnungen mit möglichst energieeffizienten Geräten, vor allem in der Küche und zum Waschen, vorzusehen (Effizienzklasse A++ oder höher). Für die Begrenzung des Warmwasserverbrauchs sind Spararmaturen mit reduziertem Durchfluss als Mindestanforderung vorzusehen.

Biomasse wie Holz, Pflanzenöle oder Biomethan sind zwar erneuerbar, stehen aber nicht in unbegrenztem Umfang zur Verfügung – sie besitzen also ein begrenztes Biomassepotenzial. Aus diesem Grund ist beim Einsatz dieser Energieträger die effiziente Nutzung eine wichtige Randbedingung für Gebäude mit Energieüberschuss. Würden in Deutschland alle Gebäude mit Biomasse versorgt, so dürfte gemäß den Berechnungen in [Diefenbach 2002] jedes Gebäude maximal 35 kWh/(m²a) Endenergie, bezogen auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes verbrauchen (entspricht 30 kWh/(m²a), bezogen auf die Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV). Dieses **Biomassebudget** wird für die Nutzung als Obergrenze festgelegt. Dabei ist einer Nutzung in Kraft-Wärme-Kopplung der Vorrang vor einer reinen Wärmenutzung zu geben.

Je geringer aufgrund von Effizienzmaßnahmen die Betriebsenergie für ein Gebäude ausfällt, desto höher ist der Anteil am Gesamtenergieaufwand über die Lebensdauer, der auf die Herstellung des Gebäudes entfällt. Bei unterschiedlichen Bauweisen kann sich der **Herstellungsenergieaufwand** oder auch Kumulierter Energieaufwand (KEA) genannt, deutlich unterscheiden (siehe Bild 7) [Feist 1997]. Bei verschiedenen Gebäudelabels wie DGNB oder LEED geht die Herstellungsenergie in die Bewertung des Gebäudes mit ein. Dazu wurden Datenbanken als Datengrundlage für verschiedene Baustoffe angelegt, und es existieren einige Softwareumsetzungen. Allerdings ist der Bilanzierungsaufwand vergleichsweise hoch, und gerade die Anlagentechnik lässt sich bisher nur begrenzt abbilden. Die genannten Labels haben sich bisher überwiegend bei Nichtwohngebäuden verbreitet. Bei Wohngebäuden sind sie noch kaum verbreitet. Somit fehlen auch für Wohngebäude die vereinfachten Bilanzierungswerkzeuge, um den Herstellungsenergieaufwand in der Planung zu bestimmen und ggf. nachzusteuern. Mittelfristig sollte, ähnlich wie beim Minergie A-Standard in der Schweiz, eine Obergrenze für den Herstellungsenergieaufwand eines Gebäudes mit Energieüberschuss festgelegt werden. Dazu müssen für verschiedene Gebäudetypen und -größen noch geeignete Zielwerte ermittelt werden. Vorerst wird die Herstellungsenergie aber nicht in der Bilanzierung berücksichtigt.

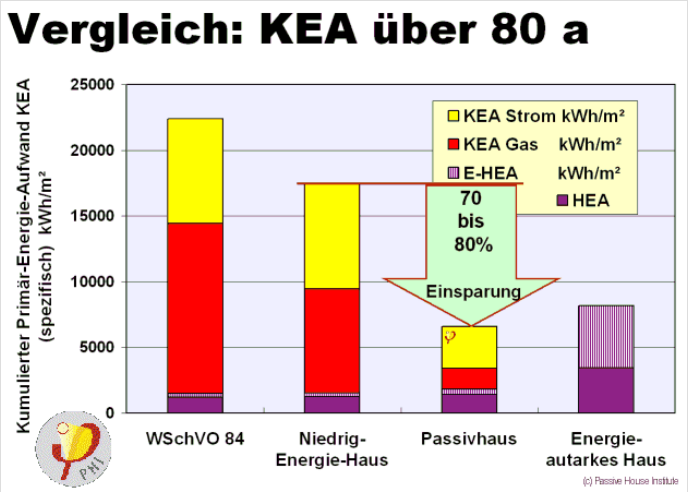


Bild 7: Graue Energie von Gebäuden unterschiedlicher Energiestandards [Feist 1997]

Für den **maximalen Bilanzausgleich** zwischen Sommer und Winter fällt es zurzeit ebenfalls noch schwer, energiewirtschaftlich belastbare Werte anzugeben. Hier sind weitere Untersuchungen des Gesamtsystems der Energieerzeugung in Deutschland, auch für die Zukunft, erforderlich.

2.3 Anforderungen an das Passivhaus mit Energiegewinn (PH+E)

Aufbauend auf den Ausführungen im vorherigen Kapitel wird für die weiteren Berechnungen in dieser Studie ein Passivhaus mit Energiegewinn folgendermaßen festgelegt:

Bilanzsystem	Bilanzierung der elektrischen Energie, Primärenergie sowie der Treibhausgasemissionen. Es muss ein Primärenergieüberschuss erreicht werden, die THG-Emissionen sollten in der Bilanz zumindest ausgeglichen sein.
Bilanzgrenze	Es wird der gesamte Wärme- und der gesamte Strombedarf des Gebäudes mit dem Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP) bilanziert. Räumliche Bilanzgrenze ist zunächst die Grundstücksgrenze. Der Import regenerativer Energieträger ist aber im Umfang des Biomassebudgets möglich.
Bilanzperiode	Die Bilanzierung erfolgt auf Basis von Monatsbilanzen, der Energiegewinn wird auf Basis der Jahresbilanz beurteilt.
Energiequellen	Es können alle regenerativen Energieträger eingesetzt werden, allerdings muss für nicht unbegrenzt zur Verfügung stehende Energieträger wie Biomasse, das Biomassebudget von 35 kWh/(m²a) eingehalten werden.
Netzkopplung	Es wird unterstellt, dass das Gebäude mindestens an das elektrische Versorgungsnetz angeschlossen ist, Wärmenetze wären bei entsprechender Versorgung und Betrieb auch denkbar. Es wird keine Energieautarkie angestrebt.
Zusätzliche Randbedingungen	Neubauten müssen nach dem Passivhausstandard errichtet werden, Bestandsgebäude mit Passivhaus-Komponenten modernisiert werden. Zusätzlich sind Effizienzanforderungen an Energieaufwand für Warmwasserbereitung, Wärmeverteilung (doppelte Dämmdicke gegenüber EnEV 2009) und Stromverbrauch (Geräteausstattung Effizienzklasse A++ oder besser) einzuhalten. Eine Betrachtung des Herstellungsenergieaufwandes findet zurzeit nicht statt.

2.4 Spezifischer kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen regenerativer Energieträger

Bei der Bilanzierung von Passivhäusern mit Energiegewinn soll die Energieerzeugung mit allen Aufwendungen für den Energieträger und die Erzeugungsanlage berücksichtigt werden – auch bei regenerativen Energieträgern, womit von den Vorgaben der EnEV abgewichen wird, die diesen Aufwand zu Null setzt. Hier sind einerseits die Bewertung der photovoltaischen Stromerzeugung, andererseits die Bewertung von Biomethan zu nennen. Biomethan wurde für den Teilbericht zur Dokumentation der Planungsphase in der Cordierstraße 4 in [Schaede, Großklos 2013] bereits ausführlich hergeleitet, so dass hier für Biomethan nur die Ergebnisse kurz dargestellt werden. Die Werte für Photovoltaikstrom werden im Folgenden ausführlich erläutert.

Photovoltaikanlagen

Nicht nur in der EnEV, auch in den Berechnungsvorschriften des BMVBS für die Bilanzierung des EffizienzhausPlus und in der DIN V 18599 wird für Photovoltaikstrom kein kumulierter Energieaufwand angerechnet (KEV „Umweltenergie“=0). Dennoch besitzen Photovoltaikanlagen einen Herstellungsenergieaufwand, der bei der Bilanzierung berücksichtigt werden sollte. Die Höhe des Wertes ist abhängig von Material und Typ der Solarmodule (Silizium monokristallin, multikristallin, amorph, CIS, ...), dem Aufwand für Deckglas, Modulrahmen sowie der Aufständerung/Befestigung und der übrigen Systemtechnik (Verkabelung, Wechselrichter, …).

Im Bilanzprogramm GEMIS sind mehrere unterschiedliche Prozesse hinterlegt, die die Umweltauswirkungen von Photovoltaik-Anlagen betrachten. In Tabelle 2 sind diejenigen Prozesse aus GEMIS aufgelistet, die sich auf das Bezugsjahr 2010 beziehen. Anschließend werden die Ergebnisse verglichen.

Tabelle 2: Untersuchte Prozesse für PV-Strom in GEMIS

Bezeichnung	Erläuterung
Solar-PV-mono ohne Aufständerung	Einzelmodul 150 Wp mit Dachbefestigung, 900 Nutzungsstunden/a
Solar-PV-mono mit Aufständerung	Gesamtanlage mit 3,36 kWp inkl. Aufständerung, 1000 Nutzungsstunden/a
Solar-PV-multi 2010 ohne Aufständerung	Einzelmodul 145 Wp mit Dachbefestigung, 900 Nutzungsstunden/a
Solar-PV-multi 2010 mit Aufständerung	Gesamtanlage mit 3,1368 kWp inkl. Aufständerung, 1000 Nutzungsstunden/a
Solar-PV-multi 2030 mit Aufständerung	Gesamtanlage mit 300 kWp inkl. Aufständerung, 1000 Nutzungsstunden/a
Solar-PV-amorph	Einzelmodul 66 Wp mit Dachbefestigung, 900 Nutzungsstunden/a
Solar-PV-CdTe-DE-2010	CdTe-Einzelmodul 100 Wp mit Dachbefestigung, 900 Nutzungsstunden/a
Solar-PV-CIGS-DE-2010	CIGS-Einzelmodul 124 Wp mit Dachbefestigung, 900 Nutzungsstunden/a

Für alle Prozesse wurde zuerst mit einer Nutzungszeit von 30 Jahren gerechnet. Die Ergebnisse in Bild 8 zeigen, dass monokristalline Module höhere KEV-Werte aufweisen als alle anderen Typen und gleichzeitig ist ein Einfluss des Ertrags und der Befestigungsmaterialien zu erkennen.

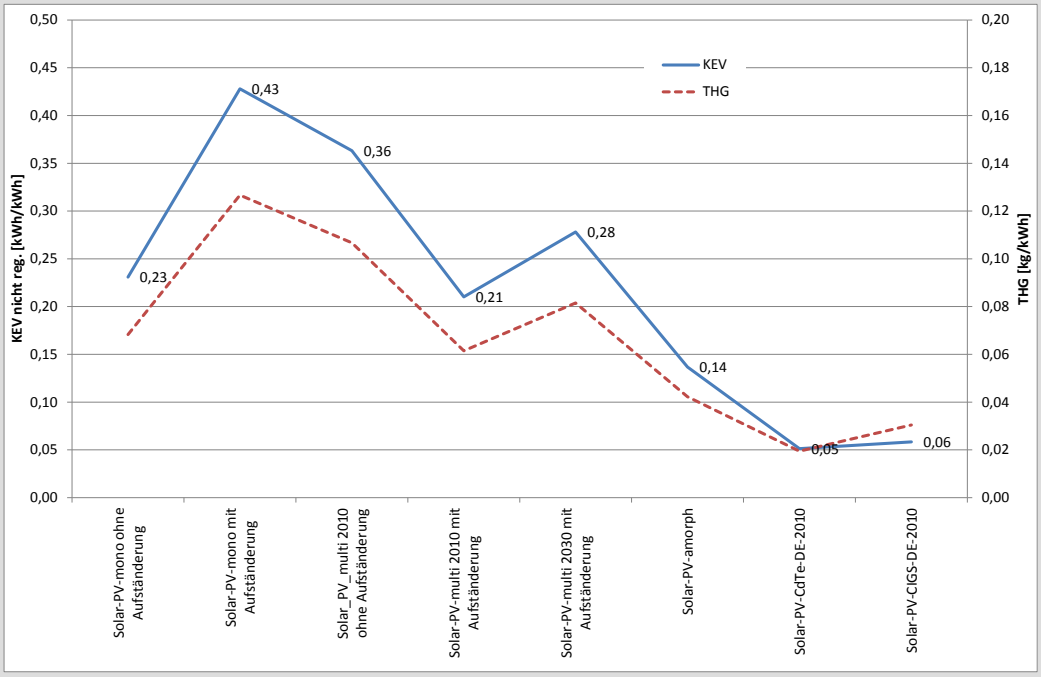


Bild 8: Spezifischer kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen von Photovoltaikanlagen nach GEMIS

Für den Prozess „Solar-PV-mono mit Aufständerung“, der für den Einsatz von hocheffizienten PV-Modulen angesetzt wird, sind in Bild 9 die Materialeinsätze variiert, um die Sensitivität der Ergebnisse zu analysieren. Während bei der Basisvariante der KEV bei 0,428 kWh_{PE}/kWh_{End} liegt, verändern sich die Werte bei einer Reduktion des Materialeinsatzes für Aluminium, Stahl oder Kupfer jeweils auf ein Drittel nur geringfügig. Wird der Siliziumeinsatz halbiert, so nähert sich das Ergebnis demjenigen Prozess von „Solar-PV-mono-DE-2010“ (ohne Aufständerung) an.

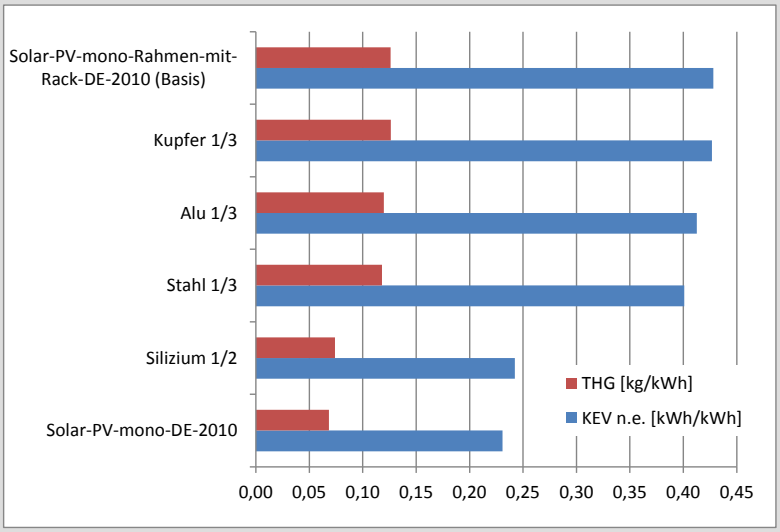


Bild 9: Variation der Materialeinsätze zur Herstellung der Photovoltaikmodule

Für monokristalline PV-Anlagen ergibt sich bei 0,428 kWh_{PE}/kWh_{End} und 30 Jahren Nutzungsdauer ein Herstellungsenergieaufwand von 11.560 kWh. Vergleicht man dieses Ergebnis mit der Literatur, so ergibt sich auf Basis der Übersicht in [Quaschning] je nach Quelle eine gute Übereinstimmung (Bild 10).

Kumulierter Energieaufwand in kWh/kWp für die Photovoltaik

Quelle	mono-Si	poly-Si	a-Si/µ-Si	CIS/CIGS
Hagedorn 1989	12.200 - 20.500	9.000 - 20.000	7.500 - 13.300	
Adler 1993	11.400 - 17.900	6.300 - 13.600	4.200 - 9.800	
Adam, Schieferdecker 1997	11.000	7.500	5.500	790 - 2.990
Alsema, Frankl, Kato 1998	13.055 - 30.277	9.722 - 26.666	5.555	
Knapp, Jester 2000 *)	5.600			3.070
Ito et al. 2010	10.420 - 13.280	7.580 - 8.500	6.970 - 8.940	5.250 - 6.360
Kim, Fthenakis 2011				2.400 - 4.870

*) Knapp, Jester: kWhel / kWp, alle anderen kWh(Primärenergie) / kWp

Bild 10: Auflistung unterschiedlicher Quellen für den Herstellungsenergieaufwand von PV-Zellen aus verschiedenen Materialien, aus [Quaschning 2011]

Berechnet man daraus die KEV-Werte, so ergeben sich mit den simulierten Erträgen des Projekts Cordierstraße von 884 kWh/kWp bei Ost-West-Ausrichtung der PV-Module (siehe Kapitel 5.2) für unterschiedliche Nutzungszeiten die Ergebnisse in Tabelle 3.

Tabelle 3: Kumulierter Energieverbrauch für PV-Module aus monokristallinem Silizium mit realen PV-Erträgen für Flachdächer, Standort Frankfurt am Main

mono-Si	KEV [kWh_{PE}/kWh_{End}]				
Lebensdauer [a]	15	20	25	**30**	35
Hagedorn 1989	1,233	0,925	0,740	**0,617**	0,528
Adler 1993	1,105	0,829	0,663	**0,552**	0,473
Adam, Schieferdecker 1997	0,830	0,622	0,498	**0,415**	0,356
Alsema, Frankl, Kato 1998	1,634	1,225	0,980	**0,817**	0,700
Ito et al. 2010	0,894	0,670	0,536	**0,447**	0,383
Ito et al. 2010, niedrigster Wert	0,786	0,589	0,471	**0,393**	0,337

Nimmt man den niedrigsten Herstellungsenergieaufwand der aktuellsten Quelle für monokristalline Zellen (Ito et al. niedrig), so ergibt sich bei 30 Jahren Betrachtungsdauer ein KEV von 0,393 kWh_{PE}/kWh_{End}, andere Werte liegen tendenziell darüber. Aus diesem Grund scheint zzt. ein Wert von 0,4 kWh_{PE}/kWh_{End} für monokristalline PV-Module nicht zu pessimistisch zu sein und wird für die Berechnungen in diesem Bericht verwendet.

Biomethan

Die Ermittlung der Primärenergie- und THG-Emissionsfaktoren für Biomethan wurde in [Schaede, Großklos 2013] ausführlich dokumentiert. Es ergaben sich je nach Substrat bei der Biogaserzeugung und Art der Gasaufbereitung sehr unterschiedliche Faktoren. In Bild 11 sind die Ergebnisse noch einmal im Vergleich zu Erdgas dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Betrachtung der Primärenergie unabhängig von Substrat und Gasaufbereitung sich deutlich niedrigere Werte ergeben als für die Referenzvariante Erdgas (Bild 11 links). Insgesamt liegen alle Varianten im Bereich von 0,3 kWh/kWh oder darunter, so dass dieser Wert für die weitere Berechnung eingesetzt wird.

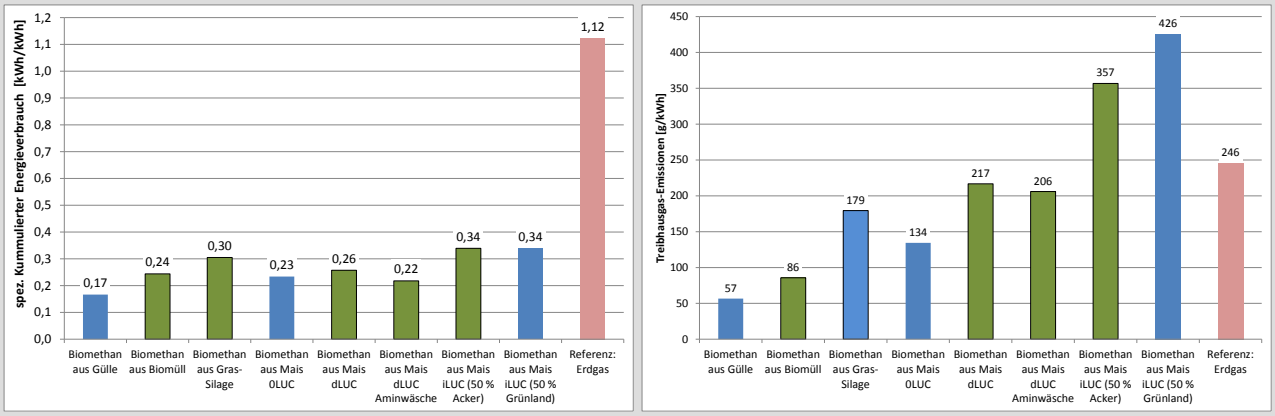


Bild 11: Vergleich verschiedener Varianten der Biomethan-Erzeugung, links: kumulierter Energieverbrauch, rechts: Treibhausgasemissionen [Schaede, Großklos 2013]

Bild 11 rechts zeigt die zugehörigen Treibhausgas-Emissionen, teilweise unter Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen, die jedoch bei einer nachhaltigen Biogaserzeugung nur in geringem Maß auftreten sollten. Hier liegen einige ungünstige Erzeugungsvarianten von Biomethan höher als Erdgas. Für Biomethan, das überwiegend aus Reststoffen hergestellt und mit geringem Gasverlust aufbereitet wird, ergeben sich THG-Emissionen von ca. 200 g/kWh$_{End}$ oder darunter. Aus diesem Grund wird für die weiteren Berechnungen dieser Wert verwendet, obwohl die Einsparung gegenüber Erdgas nur 19 % beträgt. Gleichzeitig zeigen die Werte für Biomethan aus Gülle oder Biomüll, dass auch CO_2-Einsparungen von 76 % möglich sind.

2.5 Bilanzierungswerkzeuge

Die Energiebilanz des Passivhauses mit Energiegewinn wird innerhalb dieses Berichtes mit dem Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP Version 7.1) berechnet, erweitert um die Bewertung des Energieüberschusses. Gründe sind einerseits der klare Bezug des Passivhauses mit Energiegewinn zum PHPP, andererseits die Tatsache, dass für das PHPP bei Gebäuden mit sehr niedrigem Energiebedarf bereits vielfach nachgewiesen wurde, dass die berechneten Bedarfswerte in der Praxis auch erreicht werden[3] [Passipedia 2014]. Eine Bilanzierung nach EnEV 2009 in Verbindung mit der DIN V 18599 fand für diese Untersuchung nicht statt. Für das realisierte Passivhaus mit Energiegewinn in der Cordierstraße 4 wurde in [Schaede, Großklos 2013] für die Energiebilanz ein detaillierter Vergleich der Bilanzierungsverfahren nach PHPP, EnEV sowie EnEV mit den Randbedingungen des EffizienzhausPlus durchgeführt und kann dort nachgelesen werden.

[3] Für den Fall deutlich abweichender (Nutzungs-)Randbedingungen bei Raumtemperaturen, Warmwasserverbrauch und Klima werden im Kapitel 5.2.8 Parametervariationen vorgestellt, die die Auswirkungen solcher Abweichungen aufzeigen.

Tabelle 4: Primärenergiefaktoren in kWh_{Pe}/kWh_{End}

Energieträger	GEMIS 4.8.1	EnEV 2014	DIN V 18599: 2013-05	DIN V 18599: 2011-12	EnEV 2009
Strommix Deutschland	**2,21**	2,40 ab 2016: 1,8	2,00	2,40	2,60
Verdrängungsstrommix	**2,21**	2,50 KWK: 2,80	2,50	2,80	-
Photovoltaik	**0,40**	0,00	0,00	0,00	-
Biomethan	**0,30**	1,10	0,50	0,50	1,10
Rapsöl	**0,20**	1,10	0,50	0,50	1,10

Unabhängig vom Bilanzierungswerkzeug sind für die Primärenergiebilanz des Gebäudes die angesetzten Primärenergiefaktoren für verschiedene Energieträger ausschlaggebend. Tabelle 4 zeigt die mit GEMIS (vgl. [GEMIS 2013]) berechneten Primärenergiefaktoren im Vergleich zu den in der DIN V 18599 angesetzten Werten, die für die Bilanz nach den Randbedingungen für Wohngebäude als Effizienzhaus Plus verwendet werden und den nach EnEV 2009 und EnEV 2014 zu berücksichtigenden Werten. Insbesondere dem Ansatz des Verdrängungsstrommixes aus der DIN V 18955 wird hier nicht gefolgt, sondern eingespeister und bezogener Strom werden gleich bewertet. Für die vorliegende Untersuchung werden die Primärenergiefaktoren nach GEMIS 4.8.1 genutzt. Gleiches gilt für die Bewertungsfaktoren für Photovoltaik und Biomethan, auch hier wurden die Werte verwendet, die sich bei den GEMIS-Prozessen ergeben. Die Herleitung der Zahlen in ist im Kapitel 2.4 dokumentiert.

Gleichzeitig mit den Primärenergiefaktoren können mit GEMIS Treibhausgas-Emissionsfaktoren berechnet werden (siehe Tabelle 5), so dass eine Bewertung der THG-Bilanz vorgenommen werden kann, während diese Werte für eine Bewertung nach DIN V 18599 nicht zur Verfügung stehen. Auch hier wird den regenerativen Energieträgern PV-Strom, Biomethan und Rapsöl nicht der Wert Null zugeordnet, sondern sie werden mit ihren durch die Nutzung verbundenen Umweltauswirkungen berücksichtigt.

Tabelle 5: Treibhausgasemissionen verschiedener Energieträger [GEMIS]

Energieträger	CO_2-Äquivalent in g CO_2/kWh
Strommix Deutschland	594
Photovoltaik	92
Biomethan	200
Rapsöl	179

3 Der Weg zum PH+E: Reduktion des Energiebedarfs

Zur Realisierung eines Gebäudes als Passivhaus mit Energiegewinn (Ph+E) muss zuerst die Energieeffizienz in allen Bedarfsbereichen erhöht werden. Der verbleibende Energiebedarf kann im Anschluss mit regenerativen Energien gedeckt werden. Durch eine sehr hohe Stromerzeugung, hauptsächlich durch Photovoltaik, entsteht schließlich in der Jahresbilanz der Energiegewinn des PH+E.

3.1 Warum die Reduktion des Energiebedarfs so wichtig ist

Im Gegensatz zu der beschriebenen Vorgehensweise, zuerst die Energieeffizienz in allen Bedarfsbereichen zu erhöhen, können Gebäude mit Energiegewinn teilweise auch mit Priorität auf der regenerativen Energieerzeugung vor der Umsetzung verstärkter Effizienzmaßnahmen realisiert werden. Bei diesen Gebäuden besteht ein höherer Energiebedarf für Wärme und elektrische Energie pro m² und Jahr, als bei dem in diesem Bericht untersuchten Mehrfamiliengebäude als Passivhaus mit Energiegewinn. Gemeinsam ist allen Konzepten, dass die Photovoltaik den wesentlichen Anteil für die Energieerzeugung und den Ausgleich von Bedarf und Erzeugung in der Jahresbilanz liefert. Aufgrund der sich mit zunehmender Gebäudegröße verringernden Flächen für die solare Energieerzeugung im Verhältnis zur Wohnfläche, ist es bei großen Gebäuden deutlich schwieriger einen Energieüberschuss zu erreichen, als bei kleinen Gebäuden. Eine sehr hohe Energieeffizienz ist folglich mit steigender Größe essentiell für Gebäude mit Energiegewinn. Der Passivhausstandard ist daher die optimale Grundlage zur Erreichung des Energiegewinns und bei großen Gebäuden nahezu zwangsläufig erforderlich.

Aus Sicht der Autoren ist es jedoch auch bei kleinen Gebäuden mit Energiegewinn notwendig, eine sehr hohe Energieeffizienz umzusetzen, selbst wenn große Photovoltaikflächen zur Stromerzeugung für die Kompensation eines erhöhten Energieverbrauchs zur Verfügung stehen. Betrachtet man die Energiebilanz von Gebäuden mit Energieüberschuss, die mehr Energie als das PH+E verbrauchen im Detail, z. B. in der monatlichen Bilanz, zeigt sich, dass die zeitliche Übereinstimmung von Energiebedarf und Energieerzeugung abnimmt (Bild 12). Typischerweise wird die Energie hauptsächlich durch Photovoltaik im Sommer erzeugt, während im Winter verstärkt Energie zur Beheizung benötigt wird. Die Auswirkungen auf das elektrische Netz, d. h. der Bedarf, Energie aus dem Sommer für den Winter im elektrischen Netz „saisonal zwischenzuspeichern“, wird dadurch größer. Dabei ist zu bedenken, dass die im Winter bezogene Energie aus dem elektrischen Netz nur teilweise regenerativ erzeugt wird (siehe Fußnote 12, Seite 76). Aus diesem Grund sollten Gebäude mit Energiegewinn möglichst geringe saisonale Auswirkungen auf das elektrische Netz besitzen. Der Passivhausstandard ist aufgrund seiner Energieeffizienz auch in diesem Fall die optimale Grundlage zur Errichtung eines Gebäudes, das nur geringe saisonale Auswirkungen auf das elektrische Netz besitzt.

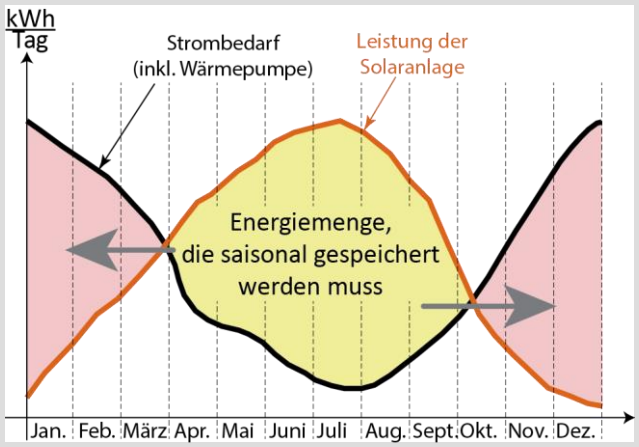


Bild 12: Prinzipieller Verlauf von Strombedarf und -erzeugung bei Gebäuden mit Wärmepumpe

Auch für die Planung und den Betrieb des Gebäudes mit Energiegewinn ergeben sich Vorteile durch die Passivbauweise. So gibt der Passivhausstandard klare Anforderungen an die Planung und den zu erreichenden Energiebedarf des Gebäudes vor – er erleichtert also die Abstimmung zwischen Energiebedarf und -erzeugung bereits in der Planungsphase. Im Betrieb haben Passivhäuser gezeigt, dass sie selbst unter geänderten Randbedingungen wie z. B. erhöhten Raumtemperaturen und somit erhöhtem Heizwärmebedarf trotzdem höchst effizient sind. Weniger effiziente Gebäude weisen bei erhöhten Raumtemperaturen einen stärkeren Anstieg des Energiebedarfs auf als Passivhäuser. Der Passivhausstandard ist daher auch in dieser Hinsicht die optimale Grundlage, um das Ziel des Energiegewinns nicht nur in der Planung sondern auch im Betrieb erreichen zu können.

Auf lange Sicht reicht jedoch lediglich die Reduktion des Heizwärmebedarfs nicht aus, um wirklich nachhaltige Gebäude zu errichten. Eine Erweiterung der Effizienzanforderungen auf alle Energiebedarfsbereiche im Passivhaus ist daher notwendig, um das Potenzial dieser Gebäude ausschöpfen zu können. Im Zuge des Bauvorhabens in der Cordierstraße 4 in Frankfurt wurde dazu ein Gesamtkonzept entwickelt, anhand dessen der Energiebedarf des Passivhauses weiter reduziert wird.

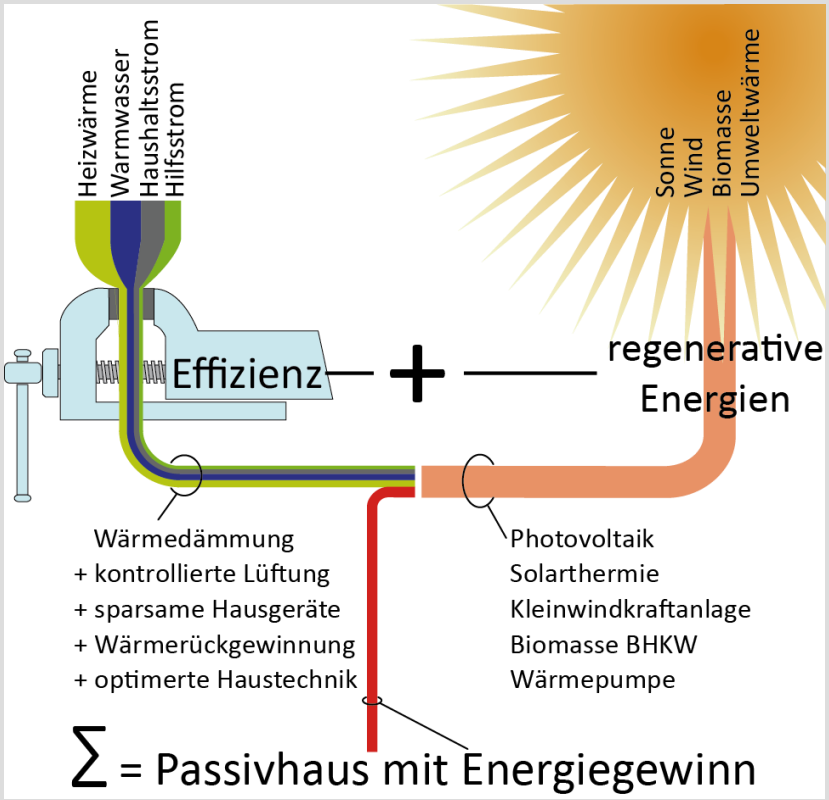


Bild 13: Ganzheitliches Effizienzkonzept und regenerative Energien führen zum PH+E

Bild 13 verdeutlicht den Weg zum Passivhaus mit Energiegewinn. Das ganzheitliche Effizienzkonzept umfasst dabei neben der Reduktion des Heizwärmebedarfs alle weiteren Bereiche des Energiebedarfs: auch der Energiebedarf für Warmwasser, Haushaltsstrom und Hilfsstrom wird reduziert. Wenn die regenerative Energieerzeugung am Gebäude (siehe Kapitel 4) den Energiebedarf des hocheffizienten Gebäudes übersteigt, ergibt sich der Energiegewinn.

Dieser Energiegewinn ist aufgrund des Verhältnisses zwischen Wohnfläche und der zur solaren Energieerzeugung zur Verfügung stehenden (Dach-)Fläche je nach Gebäude unterschiedlich groß. Dies wird in Kapitel 5 dieses Berichts anhand von Modellgebäuden verschiedener Größe dargestellt. Kleine Gebäude können sehr hohe Energieüberschüsse erzielen, wenn die gleichen Effizienzmaßnahmen und hocheffiziente solare Energieerzeuger wie für Mehrfamilienhäuser als PH+E eingesetzt werden. In der Praxis wird dies jedoch häufig nicht umgesetzt, sondern der Energiegewinn kleiner Gebäude fällt geringer aus, da sie mit geringerer Energieeffizienz errichtet und weniger effiziente Energieerzeuger eingesetzt werden. Gründe sind zum einen berechtigterweise die höheren Kosten für z. B. hocheffiziente Photovoltaikmodule. Zum anderen ist dies jedoch auch dadurch begründet, dass die Zielsetzung lediglich auf den absoluten Energiegewinn, nicht jedoch auf eine Optimierung des Energiegewinns ausgerichtet ist. Würde dieses Potenzial kleiner Gebäude mittelfristig ebenfalls genutzt, könnten sie nicht nur zur eigenen positiven Energiebilanz beitragen, sondern bei Erweiterung der Bilanzgrenze auf Quartiere und Städte, zu deren Verbesserung der Energiebilanz beitragen, indem sie andere Gebäude (z. B. solche unter Denkmalschutz) kompensieren. Um die Klimaschutzziele erreichen zu können, ist es daher langfristig notwendig, dass Energieeffizienz und hocheffiziente regenerative Energieerzeugung unabhängig von der Gebäudegröße bestmöglich umgesetzt werden.

Die erforderlichen Effizienzmaßnahmen müssen, wie beschrieben, in allen Bereichen des Energiebedarfs umgesetzt werden: der Bedarf an Heizwärme und Wärme für Warmwasser muss reduziert werden, und auch Haushalts- und Hilfsstrombedarf muss durch entsprechende Anlagentechnik minimiert werden. Einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung können jedoch auch die Nutzer liefern, denn Energieeffizienz ist nicht nur eine Frage der Technik, sondern auch des effizienten Einsatzes der zur Verfügung gestellten Energie. Die einzelnen Punkte werden im Folgenden erläutert.

3.2 Heizenergie

Der Heizwärmebedarf wird beim PH+E durch Umsetzung des seit zwei Jahrzehnten erprobten Passivhausstandards reduziert. Die wesentlichen Bestandteile sind eine sehr gute thermische Hülle durch Wärmedämmung der Außenbauteile, Passivhausfenster, die Vermeidung von Wärmebrücken, eine hohe Luftdichtheit der Gebäudehülle und eine Lüftungsanlage mit hoher Wärmerückgewinnung.

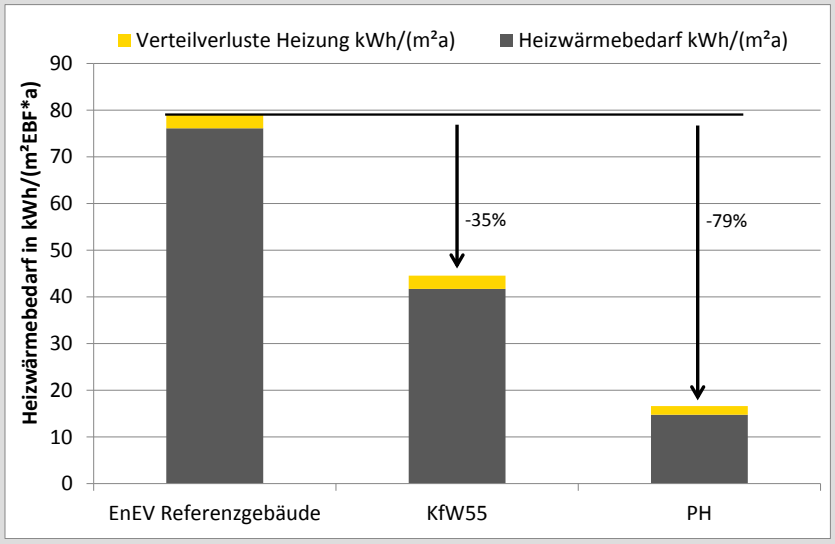


Bild 14: Energieeinsparung durch Bau im Passivhausstandard im Vergleich zu EnEV 2009 und KfW55

Bild 14 verdeutlich die durch den Passivhausstandard mögliche Energieeinsparung am Beispiel eines kleinen Mehrfamilienhauses mit acht Parteien (Modellgebäude Nr. 1 aus Kapitel 5). Der dargestellte Heizwärmebedarf wurde anhand des Passivhaus Projektierungs-Pakets ermittelt, abhängig vom energetischen Standard des Gebäudes. Mit einer Heizenergieeinsparung von 79 % gegenüber dem Referenzfall nach EnEV zeigt sich das hohe Effizienzpotenzial dieser Bauweise. Der Passivhausstandard ist daher Grundlage des ganzheitlichen Effizienzkonzeptes.

3.3 Energiebedarf für die Warmwasserbereitung

Energie für die Warmwasserbereitung kann an vielen Stellen eingespart werden. Eine naheliegende Möglichkeit ist zuerst die Reduzierung des Wasserverbrauchs. Im Anschluss an die Einsparung beim Volumen wird jedoch noch ein wesentlicher Wasserverbrauch bleiben, der bei der Bereitstellung von Warmwasser zu einem erheblichen Energiebedarf führt. Dieser hat beim Mehrfamilienhaus eine ähnliche Größenordnung wie der Heizwärmebedarf des Passivhauses (vgl. Bild 15). Er ist im Wesentlichen abhängig von der Belegungsdichte bzw. der projektierten Bewohnerzahl. Diese sollte daher bei der Planung des Mehrfamilienhauses als PH+E möglichst gut abgeschätzt werden, schließlich muss der Bedarf im Betrieb des Gebäudes auch bereitgestellt werden können. Zusätzlich fallen insbesondere bei zentraler Warmwasserbereitung mit einer Zirkulationsleitung erhebliche Wärmeverluste bei der Verteilung an. Eine zentrale Warmwasserbereitung kann jedoch bei der Integration regenerativer Energien notwendig sein, daher gilt es die Verteilverluste zu reduzieren. Maßnahmen zur Reduktion der Verteilverluste sind ein möglichst kurzes Leitungsnetz, eine erhöhte Dämmung der Rohrleitungen, die Reduktion der Warmwassertemperatur und wenn möglich, eine Reduktion der Zirkulationszeiten.

Bild 15 zeigt die Aufteilung des Energiebedarfs am Beispiel des Gebäudes Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main. Die Warmwasserbereitung hat einen sehr großen Anteil am Gesamtenergiebedarf des Gebäudes, es wird für sie mehr Wärme als für die Beheizung benötigt. Ohne die Umsetzung spezieller Effizienzmaßnahmen erhöhen die Verteil- und Speicherverluste den Energiebedarf zur Bereitstellung des Warmwassers um 50 %. Diese Verluste können mit den im Folgenden vorgestellten Maßnahmen nahezu halbiert werden.

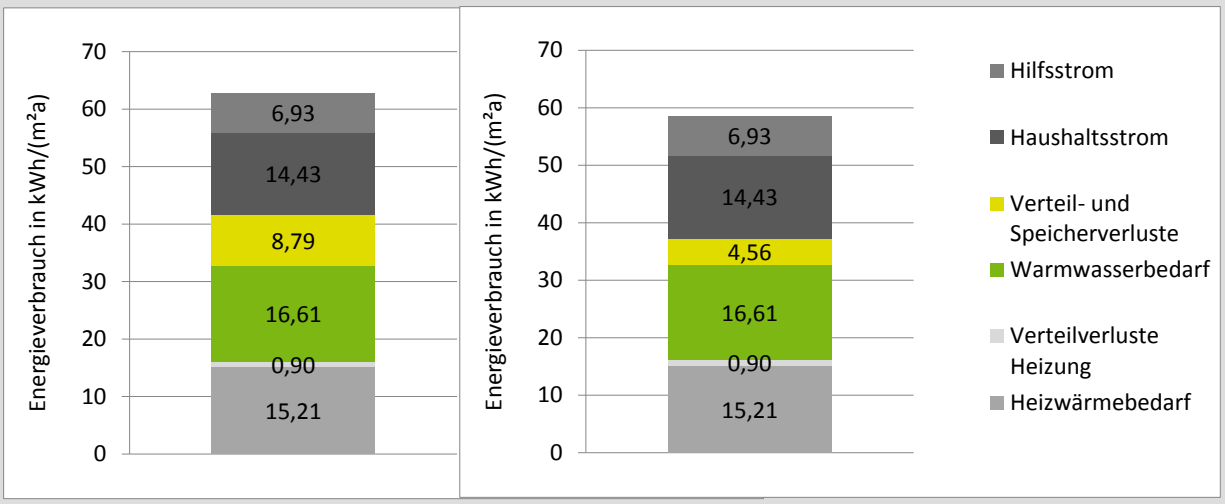


Bild 15: Aufteilung des Energiebedarfs des Gebäudes Cordierstraße 4 in kWh/(m²a), links ohne, rechts mit Optimierungsmaßnahmen zur Reduktion der Verteilverluste

Reduzierung des Wasserverbrauchs

Grundlage der Reduzierung des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung ist an erster Stelle eine Reduzierung des Wasserverbrauchs. Technische Möglichkeiten bieten sich hier durch Spararmaturen. Mittlerweile gibt es z. B. Duschbrausen, die ohne hohen Komfortverlust mit einen Durchfluss von nur noch 6 l Wasser/Minute auskommen. Dies wird durch Zumischung von Luft zum Duschwasser erreicht. Der benötigte Durchfluss kann durch die Verwendung dieser Duschbrausen im Vergleich zu Standardbrausen halbiert werden. Ähnliche Einsparungen können auch durch entsprechende Armaturen an Wasserhähnen erzielt werden. Spülmaschinen und Waschmaschinen werden ebenfalls hinsichtlich Wasserverbrauch und Energieeffizienz weiterentwickelt, so dass auch in diesem Bereich sehr sparsame Geräte verfügbar sind. Diese Techniken stellen in vielen Fällen auch eine sehr kostengünstige Methode der Einsparung dar. Sie ist aber bisher schwer planbar, denn wesentlichen Einfluss auf die Reduktion des Wasserverbrauchs hat neben den technischen Möglichkeiten auch der Nutzer selbst durch sein Verhalten. Durch dessen verstärkte Motivation zu energiesparendem Verhalten (vgl. Kapitel 3.6) können hier zusätzliche Einsparungen erzielt werden.

Reduzierung der Verteilverluste

Eine Reduzierung der Verteilverluste kann sehr effizient durch ein kurzes Rohrleitungsnetz erreicht werden. Dies muss bereits in der Planung der Gebäude berücksichtigt werden. Eine wesentliche Reduktion der Verteilverluste lässt sich auch durch eine verbesserte Dämmung der Rohrleitungen gegenüber EnEV-Anforderungen erzielen. Bei einer Dämmung der Zirkulationsleitungen mit 250 % der EnEV-Anforderungen können die Verteilverluste der Warmwasserbereitung im Verhältnis zum Nutzwärmebedarf von 53 % auf 43 % reduziert werden (vgl. Bild 16).

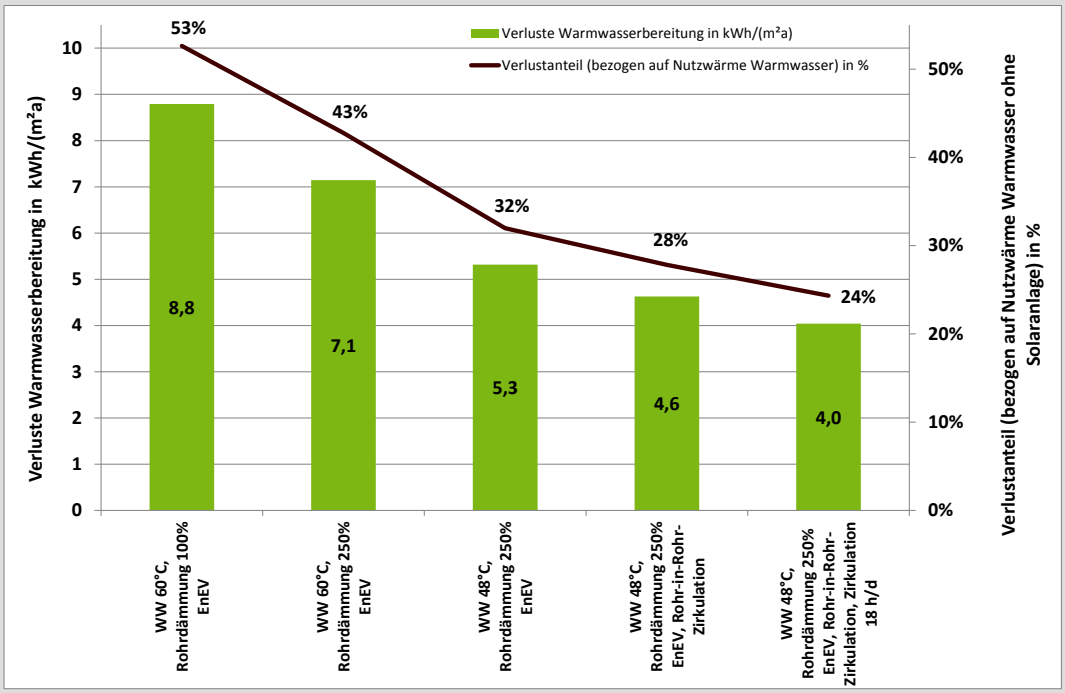


Bild 16: Reduktion der Verteilverluste der Warmwasserbereitung[4]

[4] Für die Berechnungen zur Reduktion der Verteilverluste (vgl. Bild 16) wurde ein typisches Rohrleitungsnetz am Beispiel des Gebäudes Cordierstraße 4 berücksichtigt.

Zusätzlich trägt die erhöhte Dämmung der Warmwasserleitungen dazu bei, dass das Gebäude im Sommer weniger erwärmt wird. Weiterhin werden die Kaltwasserleitungen, die meist neben den Warmwasserleitungen verlegt werden, bei einer stärkeren Dämmung der Warmwasserleitungen weniger erwärmt. Dies bietet Vorteile für die Hygiene, da die Kaltwasserleitungen weniger verkeimen (hierzu reichen bereits Temperaturen von 20 - 30 °C aus). Aktuell wird die Verkeimung von Kaltwasserleitungen zwar nach der Trinkwasserverordnung (vgl. [TrinkwV 2001]) nicht kontrolliert, die Erhöhung der Trinkwasserhygiene bei Kaltwasserleitungen ist jedoch als sehr positiver Nebeneffekt des Passivhauses mit Energiegewinn ein weiteres wichtiges Argument gegenüber dem Bauherren.

Durch eine Reduktion der Warmwassertemperatur von 60 °C auf 48 °C können die Verteilverluste weiter reduziert werden, in diesem Beispiel von 43 % auf 32 % (vgl. Bild 16). Eine Warmwassertemperatur von 48 °C oder ggf. sogar nur 45 °C reicht aus, um den benötigten Komfort bereitzustellen. In der Praxis wird die Warmwassertemperatur zwar auf einem Temperaturniveau von 60 °C oder mehr zur Verfügung gestellt, an den Entnahmestellen für gewöhnlich durch Zumischung von Kaltwasser als Verbrühungsschutz jedoch auf ca. 50 °C reduziert. Für die Nutzer entsteht daher durch eine Temperaturreduzierung bereits vor der Verteilung keine Veränderung, während jedoch Energie für die Warmwasserbereitung und -verteilung in einer erheblichen Größenordnung eingespart werden kann. Neben einer Reduktion der Verteilverluste können mit niedrigen Warmwassertemperaturen auch höhere solare Deckungsgrade beim Einsatz einer thermischen Solaranlage erreicht werden.

Bild 17: Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser: Erhöhte Dämmung der Rohrleitungen mit 250 % nach EnEV (links), Einsatz einer Diaphragmalyse (Mitte) und Rohr-in-Rohr-System (rechts)

Quelle: linkes Bild: IWU (Projekt Cordierstraße 4), Bild Mitte: IWU (Projekt Rotlintstraße); rechtes Bild: Viega

Eine Reduktion der Warmwassertemperatur ist jedoch nur möglich, wenn die hygienischen Abforderungen an die Warmwasserbereitung weiterhin erfüllt werden können. So wird die Warmwasserbereitung und

Verteilung üblicherweise zur thermischen Desinfektion auf einem Temperaturniveau von ca. 60 °C betrieben. Wird das Wasser auf andere Weise desinfiziert, kann daher die Temperatur abgesenkt werden. Eine Möglichkeit bietet die chemische Desinfektion durch z. B. eine Diaphragmalyse (vgl. Bild 17 Mitte). Dieser Prozess erzeugt aus einer wässrigen Lösung von Salztabletten hypochlorige Säure und dosiert diese in sehr geringen Mengen in das Trinkwasser ein. Im Bereich der Warmwasserhygiene sind jedoch in den nächsten Jahren noch neue Entwicklungen möglich und notwendig.

Die Verteilverluste können darüber hinaus weiter reduziert werden, indem durch den Einsatz eines Rohr-in-Rohr-Systems die Länge des Verteilnetzes weiter reduziert wird. Das Rohr-in-Rohr-System kann bei den Steigleitungen der Zirkulation eingesetzt werden. Dabei wird der Zirkulationsrücklauf innerhalb der Warmwasserleitung in einem kleinen Kunststoffrohr zurückgeführt. Die Warmwassersteigleitungen werden dafür mit etwas größerem Durchmesser ausgeführt, es können jedoch die kompletten Wärmeverluste der vertikalen Zirkulationsleitungen eingespart werden. Die Verteilverluste reduzieren sich durch den Einsatz dieses Systems in dem exemplarisch dargestellten Gebäude von 32 % auf 28 % des Wärmebedarfs für Warmwasser[5]. Außerdem reduziert sich der Platzbedarf in den Steigschächten und der Aufwand für die Dämmung der Leitungen.

Eine zusätzliche Möglichkeit, die Verluste der Warmwasserverteilung zu reduzieren, ist die Reduktion der Zirkulationszeiten. Da während der Nacht kein oder nur wenig Warmwasser benötigt wird, führt die Abschaltung der Zirkulation zu diesen Zeiten zur weiteren Einsparung. Im dargestellten Beispiel (vgl. Bild 16) können Verluste in Höhe von weiteren 4 % eingespart werden. Um den Komfort für die Nutzer beizubehalten, sollten in diesem Fall Schalter installiert werden, mit denen die Nutzer die Zirkulation manuell in Betrieb nehmen können und somit auch während Zeiten der abgeschalteten Zirkulation im Bedarfsfall warmes Wasser auf dem üblichen Temperaturniveau schnell verfügbar haben. Diese Technik wird in Einfamilienhäusern bereits seit längerer Zeit erfolgreich eingesetzt. Für Mehrfamilienhäuser, insbesondere wenn sie vermietet werden, ergibt sich hier u. U. die Schwierigkeit, die Akzeptanz der Bewohner für den Einsatz dieser Technik zu gewinnen. Auch für die Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser ist daher ebenfalls die Motivation der Nutzer zum sparsamen Umgang mit Warm- und Kaltwasser sowie Akzeptanz neuer Konzepte zur Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser wichtig, um die bestehenden Potenziale voll ausschöpfen zu können.

3.4 Haushaltsstrom

Der Haushaltsstrombedarf in Deutschland ist im Gegensatz zum Heizwärmebedarf in den letzten Jahren gestiegen und stagniert aktuell auf hohem Niveau (vgl. [BMWi 2013]). Eine Studie der IEA zeigt, dass der Anstieg des Stromverbrauchs weltweit hauptsächlich in den Bereichen der Anwendungen, d. h. beim Einsatz von Geräten mit elektrischem Energieverbrauch, zu verzeichnen ist (vgl. Bild 18). Einen großen Anteil an dem Anstieg des Verbrauchs haben gemäß [IEA 2009] die vermehrte Nutzung von Fernsehern, PCs und weiteren elektronischen Geräten. Die Energieeinsparung durch den Einsatz energieeffizienter Geräte auf der einen Seite wird durch die steigende Anzahl elektronischer Geräte und deren ausgiebige Nutzung wieder ausgeglichen. Die Autoren dieses Berichts vermuten diesen Trend auch in Deutschland. Auch in hier besteht sehr wahrscheinlich weiterhin der Trend mehr „Energiedienstleistungen“ in Anspruch zu nehmen, der Verbrauch steigt jedoch aufgrund des Einsatzes energieeffizienterer Geräte nicht weiter an.

[5] Die genannten Einsparungen beziehen sich auf die gezeigte Reihenfolge der einzelnen Maßnahmen. Wird die Rohr-in-Rohr-Zirkulation gegen 60 °C und geringerer Dämmung der Leitungen verglichen, liegen die Einsparungen dieser Maßnahme deutlich höher.

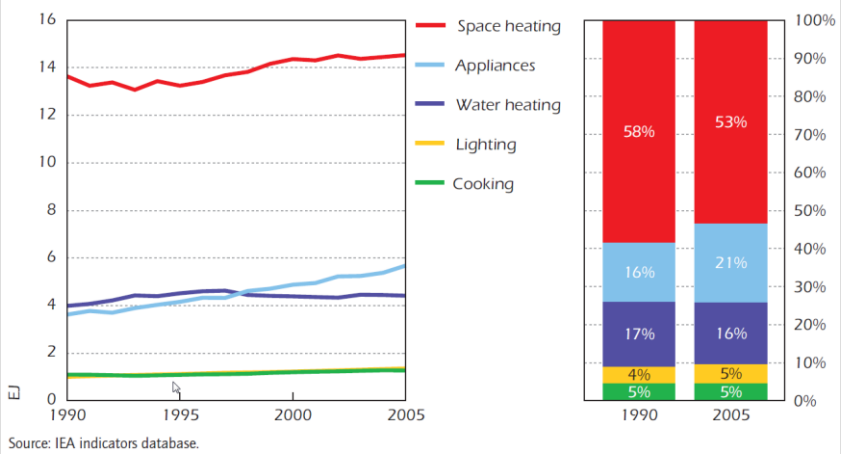


Bild 18: Elektrischer Energieverbrauch nach Bereichen

Quelle: [IEA 2008]

Für das Passivhaus mit Energiegewinn ist es besonders wichtig, Energieeinsparungen beim Haushaltsstrom umzusetzen, um den Haushaltsstrombedarf auf ein ähnliches Niveau wie den Heizwärme- und den Wärmebedarf für Warmwasser reduzieren zu können. Auch wenn das Nutzerverhalten einen wesentlichen Beitrag zum Stromverbrauch liefert, ist eine Grundvoraussetzung die Ausstattung der Wohnung mit energieeffizienten Geräten und einer energieeffizienten Beleuchtung. Bild 19 verdeutlicht die möglichen Einsparpotenziale im Bereich der Haushaltsgeräte und der Beleuchtung.

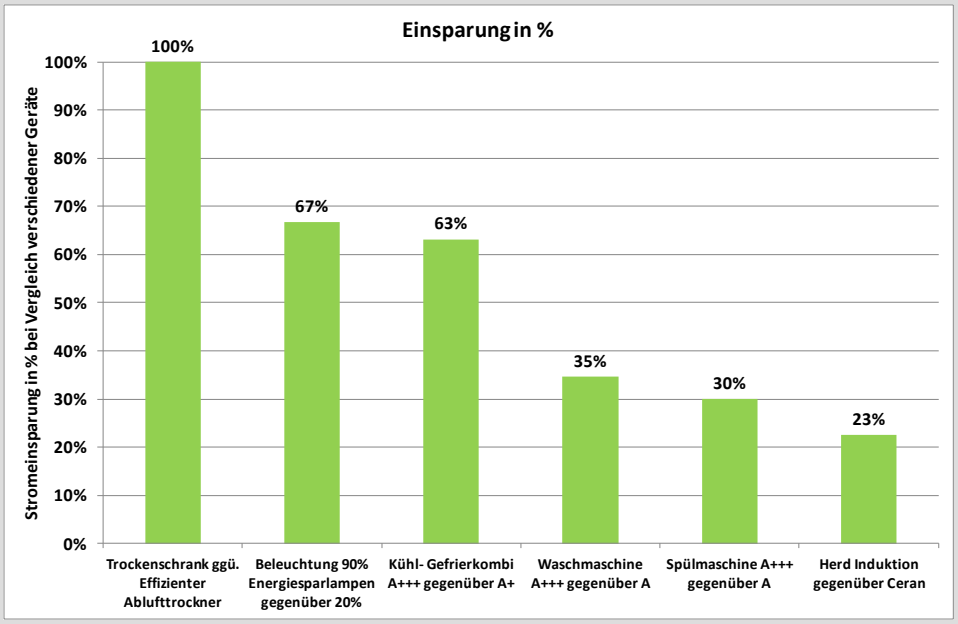
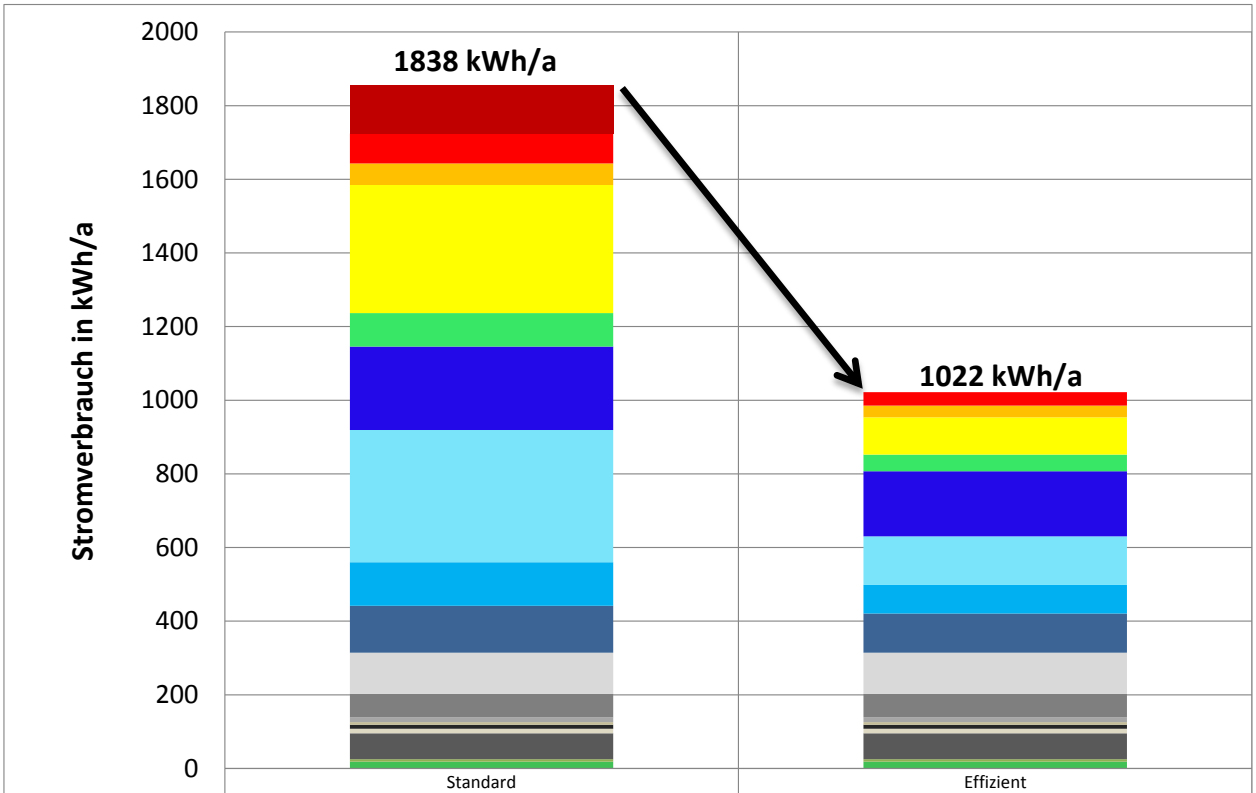


Bild 19: Energieeinsparung durch Haushaltsgeräte und Beleuchtung höchster Effizienzklassen

Die prozentual größte Einsparung an elektrischer Energie kann durch den Verzicht auf einen Wäschetrockner erzielt werden. Für einen höheren Komfort gegenüber der Nutzung eines üblichen Wäscheständers

bietet sich in Passivhäusern die Nutzung von Trockenschränken an, die die Wäsche schnell trocknen können, ohne dass ein Wäscheständer aufgestellt werden muss. Trockenschränke werden dazu im Bad der Wohnung vor der Abluftabsaugung installiert. Die Wäsche wird darin analog eines Wäscheständers aufgehängt. Durch die Luftabsaugung innerhalb des Trockenschrankes wird die Wäsche mit mehr Luft umströmt als bei Aufstellung in einem Zimmer und trocknet dadurch schneller, aber ohne wesentlichen Energieaufwand. Sehr viel Einsparpotenzial existiert auch bei der Beleuchtung durch Einsatz von Energiesparlampen oder besser noch LED-Beleuchtung. Bei den Haushaltsgeräten besteht das größte Einsparpotenzial im Bereich energiesparender Kühlschränke.



	Standard	Effizient
Trockner	133 kWh/a	0 kWh/a
Modem	81 kWh/a	36 kWh/a
TV	59 kWh/a	32 kWh/a
Beleuchtung	348 kWh/a	101 kWh/a
Mikrowelle	91 kWh/a	45 kWh/a
Herd	226 kWh/a	177 kWh/a
Kühl-/Gefrierkombi	359 kWh/a	132 kWh/a
Waschmaschine	119 kWh/a	78 kWh/a
Geschirrspüler	127 kWh/a	107 kWh/a
Föhn	112 kWh/a	112 kWh/a
Staubsauger	63 kWh/a	63 kWh/a
HiFi	13 kWh/a	13 kWh/a
DVD-Player	7 kWh/a	7 kWh/a
Fax/Scanner/Drucker	11 kWh/a	11 kWh/a
Monitor	12 kWh/a	12 kWh/a
PC	70 kWh/a	70 kWh/a
Laptop	7 kWh/a	7 kWh/a
Tablet	18 kWh/a	18 kWh/a

Bild 20: Haushaltsstrombedarf eines 2-Personen-Haushalts bei Nutzung von Standardgeräten (links) und mit effizienten Geräten (rechts)

Die Auswirkungen des Einsatzes hocheffizienter Geräte und Beleuchtung unter Berücksichtigung typischer Nutzungsprofile (vgl. [HMUELV 2011], [dena 2011a]) ist in Bild 20 für einen 2 Personen-Haushalt dargestellt.

Der sich ergebende Energiebedarf von lediglich ca. 1000 kWh/a ist durch die konsequente Nutzung energiesparender Geräte bei nahezu gleicher Nutzungsdauer erreichbar. Ein Haushaltsstromverbrauch in Höhe der Variante „Standard-Ausstattung“ von 1800 kWh/a konnte unter ähnlichen Randbedingungen, wie sie dieser Berechnung zugrunde liegen, bereits in 2 Personen-Haushalten nachgewiesen werden (vgl. [Großklos 2013]). Einzelne Personen konnten den sehr geringen Energiebedarf der „Effizienten Ausstattung“ bereits in der Praxis erreichen. Auch das Öko-Institut (vgl. [Schleicher 2011]) beschreibt ein erhebliches Einsparpotenzial im Bereich des Haushaltsstromverbrauchs.

„Ein typischer 2 Personen Haushalt kann mit heutigen Technologien circa 2/3 seines jährlichen Stromverbrauchs gegenüber dem jährlichen Durchschnittsverbrauch von 3.440 kWh einsparen“

Die in Bild 20 dargestellten Werte stellen daher den im Optimalfall mit energieeffizienten Geräten erzielbaren Stromverbrauch dar, der aber durchaus in der Praxis erreichbar sein sollte. Unabhängig von der Geräteausstattung können Nutzer wesentlich zur Reduktion des Stromverbrauchs beitragen, indem Sie die Standby-Verluste in ihrer Wohnung reduzieren. In [Schleicher 2011] wird ein Einsparpotenzial von ca. 400 - 500 kWh/a bei den Standby-Verlusten eines typischen Haushalts ermittelt (vgl. Bild 21). Die Standby-Verluste fallen zwar im Zuge des Einsatzes energieeffizienter Geräte etwas geringer aus, sind jedoch trotzdem sehr wichtiger Bestandteil bei der Haushaltsstromeinsparung. Es empfiehlt sich daher, die Abschaltung des Standby-Verbrauchs für die Nutzer zu vereinfachen. Dies ist z. B. durch die Installation von Standby-Abschaltern in den einzelnen Räumen möglich. Analog eines Lichtschalters können dadurch einzelne Steckdosengruppen bei Verlassen des Raumes einfach abgeschaltet werden.

2 Personen Haushalt Geräte	Leistungs-aufnahme (W)	Tägliche Stand-By Dauer [h]	Jährlicher Stromverbrauch [kWh/a]
Fernseher 32“ LCD	14,3 W	19 h	93 kWh/a
DVB-T Receiver	10	19	65
DVD Recorder mit Festplatte	8	22	60
Stereoanlage	10	20	72
Radio	2	23	16
Computer / LCD Bildschirm / Drucker	10	19,5	67
DSL Modem inkl. WLAN Router	7	19,5	47
Espressomaschine Stand-By	2	24	18
Espressomaschine Warmhalten (6h pro Tag)	35	6	71
Summe			**~510**

Bild 21: Einsparpotenzial Standby-Verluste

Quelle: [Schleicher 2011]

3.5 Hilfsenergie

Elektrische Hilfsenergie wird in vielen Gebäudebereichen eingesetzt (z. B. Treppenhausbeleuchtung, Anlagentechnik). Bei Mehrfamilienhäusern wird hier häufig auch von Allgemeinstrom gesprochen. Die Höhe des Allgemeinstroms in üblichen Mehrfamilienhäusern des Gebäudebestandes beträgt laut [Clausnitzer, Hoffmann 2009] ca. 250 - 335 kWh pro Jahr und Wohnung, bzw. 3 - 5 kWh/(m²Wohnfläche*a), inklusive der Hilfsenergie für Heizung und Warmwasserbereitung. Als wesentliche Verbrauchskategorien werden im Rahmen der genannten Studie die in Tabelle 6 aufgelisteten Bereiche untersucht:

Tabelle 6: Anwendungen mit Hilfsenergieverbrauch (Auszug aus [Clausnitzer, Hoffmann 2009])

Kommunikation und Unterhaltung	Klingel-/Türöffnungsanlage, Radio/TV-Komponenten, Feuermeldeanlage, Alarmanlage, Videoüberwachung
Beleuchtung	Treppenhaus, Flure, Gemeinschaftsräume, Garagen, Außenbeleuchtung, Notausgänge
Weitere Haustechnik	Aufzüge, Druckerhöhungsanlagen, Lüftungsanlagen im Allgemeinbereich, Wasseraufbereitung, motorische Antriebe, Außenheizungen
Heizung und Warmwasser	Pumpen (Heizungs-, Förder- Zirkulations-, Speicherladepumpen, etc.), Brenner, Regelung(en), Fernüberwachung

In einem Passivhaus mit Energiegewinn wird der Hilfsstrombedarf typischerweise höher ausfallen als in einem Bestandsgebäude gleicher Größe. Ursache sind an dieser Stelle zusätzliche technische Komponenten, die elektrische Energie verbrauchen, die jedoch maßgeblich zur Energieeffizienz des Gebäudes beitragen oder durch den Einsatz regenerativer Energien anfallen.

Tabelle 7: zusätzliche Anwendungen mit Hilfsenergie in einem PH+E

Weitere Haustechnik	aufwändigere Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung, Regelungs- und Messtechnik, ggf. Diaphragmalyse
Heizung und Warmwasser	Energieeinsatz von Wärmepumpen, zusätzliche Pumpen und Regelungen für solarthermische Anlagen oder andere zusätzliche Wärmeerzeuger

Der Gewinn an Energieeffizienz auf der Wärmeseite rechtfertigt diesen zusätzlichen Hilfsstrombedarf. Er muss jedoch durch Einsatz energiesparender Technik möglichst stark reduziert werden.

Ein möglichst geringer Hilfsstromeinsatz kann durch verstärkte Berücksichtigung dieses Aspektes bereits in der Planung erzielt werden. Vorrang sollte an erster Stelle die Vermeidung von Komponenten mit Hilfsstrombedarf haben, an zweiter Stelle steht der konsequente Einsatz besonders energieeffizienter Komponenten. So kann auch in diesem Bereich durch energieeffiziente Beleuchtung, z. B. auf Basis von LED-Technologie, viel Energie eingespart werden. Auch in vielen anderen Bereichen der Anlagentechnik gibt es bereits sehr sparsame Geräte (z. B. Aufzüge, Pumpen, Lüftungsanlagen u.v.m.).

Die Bauweise hat ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf den Hilfsstromeinsatz. So kann z. B. Energie eingespart werden, wenn das Gebäude über Laubengänge erschlossen wird anstelle von innen liegenden Treppenhäusern. Je nach Gebäudegröße können hierdurch Aufzüge eingespart werden, da in den meisten Fällen ein Aufzug pro Laubengang ausreichend ist. Zusätzlich besteht bei der Laubengangerschließung eine höhere Belichtung durch Tageslicht, es wird daher weniger Beleuchtung benötigt.

Zu berücksichtigen ist auch, dass Tiefgaragen in der Regel hohe Energieverbräuche aufweisen. Zum einen durch die Beleuchtung und Belüftung, zum anderen werden hier gegen eine Vereisung im Winter häufig Rampenheizungen in der Einfahrt installiert, die durch elektrische Heizmatten mit einer Heizleistung von 200 - 300 W/m² im Winter über viele Stunden betrieben werden. Kann der Bau einer Tiefgarage durch andere Maßnahmen zur Schaffung von Stellplätzen vermieden werden, ist dies daher vorteilhaft für die Energiebilanz des Gebäudes.

3.6 Nutzerverhalten

Die dargestellten technischen Einsparmöglichkeiten bieten eine optimale Grundlage, einen niedrigen Energieverbrauch zu erreichen. Der Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch des Gebäudes ist trotz effizienter Technik ein wesentlicher Faktor, um die prognostizierten Energieeinsparungen im Betrieb auch tatsächlich zu erreichen. Ein nicht optimales Nutzerverhalten hat bei besonders energieeffizienten Gebäuden eine deutlich geringere Auswirkung als bei normalen Gebäuden, z. B. steigt der Heizwärmeverbrauch bei höheren Innentemperaturen aufgrund der guten Dämmung deutlich weniger an, als bei Gebäuden energetisch schlechterer Qualität. Bei einem Gebäude, das in der Planungsphase einen geringen Energiegewinn erzielt, kann jedoch ggf. aufgrund eines erhöhten Energieverbrauchs durch gleichgültiges Nutzerverhalten im tatsächlichen Betrieb keinen Überschuss an Energie mehr erzielt werden. Daher ist es wichtig, zum einen die Nutzer zu energiesparendem Verhalten zu motivieren und zum anderen bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen, welche Auswirkungen das Nutzerverhalten auf die im Gebäude verwendeten Techniken und den Energieverbrauch haben könnten (vgl. Kapitel 5.2.8).

Motivation der Nutzer zu energiesparendem Verhalten

Energie können die Nutzer in allen Verbrauchsbereichen einsparen: bei der Heizenergie, dem Warmwasser und insbesondere auch beim Haushaltsstrom. Projekte, z. B. esesh („Saving energy in social housing with ICT“), die zum Ziel haben, mit unterschiedlichen Methoden der Verbrauchsrückmeldung die Nutzer zu sparsamem Verhalten zu motivieren, brachten bisher folgende Ergebnisse: Durch die Rückmeldung des Energieverbrauchs für Heizung ließ sich in Bestandsgebäuden z. B. eine Einsparung von 9 % gegenüber dem ursprünglichen Heizenergieverbrauch der Nutzer realisieren (vgl. Bild 22 und [Korte et al. 2013]). Für elektrische Energie liegt diese Einsparung bei 6 %, für Warmwasser bei 7 % und für Kaltwasser bei 6 %.

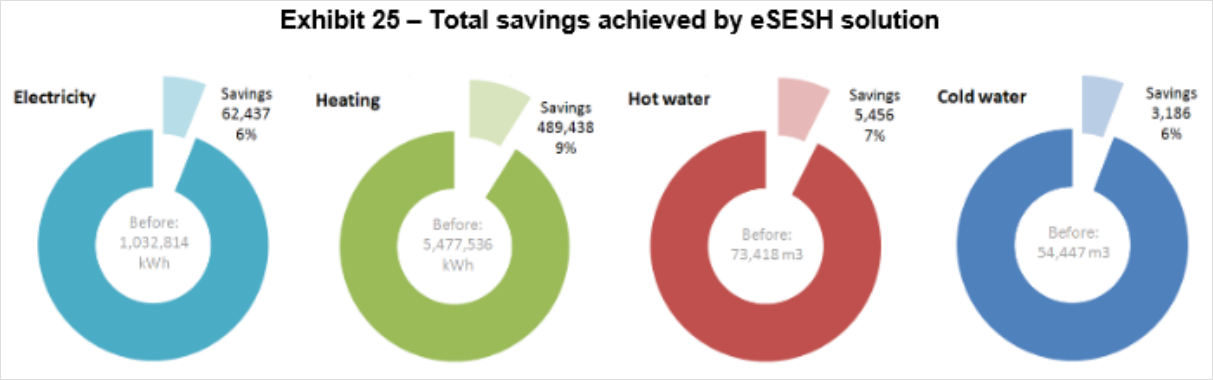


Bild 22: Ressourceneinsparung durch Nutzerrückmeldung

Quelle: [Korte et al. 2013]

Die in Bild 22 dargestellten Werte beziehen sich auf das 1. Jahr nach Rückmeldung der Verbräuche. Laufende Projekte zeigen jedoch, dass die erzielte Einsparung in den Folgejahren häufig wieder rückläufig ist. Dies bedeutet, dass die Nutzer sehr schnell wieder alte Verhaltensschemata anwenden, dadurch wieder mehr Energie verbrauchen und schließlich auf Dauer nahezu keine Einsparung erreicht wird. Ziel muss es daher sein, die Nutzer fortwährend zum Energiesparen zu motivieren, um so schließlich langfristige Verhaltensänderungen herbeiführen zu können. Die Forschungen in diesem Bereich zeigen, dass durch eine Verbrauchsrückmeldung Einsparungen erzielt werden können, jedoch noch weitere Entwicklung und Forschung erforderlich ist, um langfristig die Potenziale der Einsparung durch energiesparendes Nutzerverhalten realisieren zu können.

4 Deckung des Energiebedarfs mit regenerativen Energien

Nach der Reduktion des Energiebedarfs des Gebäudes, muss bei einem Passivhaus mit Energiegewinn der verbleibende Restenergiebedarf sowohl auf der Wärme-, wie auch auf der Stromseite vollständig regenerativ gedeckt werden. Es bezieht dazu alle verfügbaren regenerativen Energieträger mit ein, solange sie verantwortungsvoll genutzt werden (vgl. Kapitel 2.2).

Bisher umgesetzte Gebäude mit Energieüberschuss wurden besonders bei Einfamilienhäusern oft so realisiert, dass sie als einzigen Energieträger elektrische Energie nutzen. [Lücking, Hauser 2012] beschreiben ihr Verständnis des „Plusenergiehauses“ wie folgt: „Ein Plusenergiehaus ist gekennzeichnet durch ein monoenergetisches Versorgungskonzept auf Basis des Energieträgers Strom“, die Energie wird „in Photovoltaik- oder Klein-Windkraftanlagen produziert“. Die Autoren des vorliegenden Berichts sehen es als erforderlich an, in die Definition des Passivhauses mit Energiegewinn die Nutzung aller verfügbaren regenerativen Energieträger mit einzubeziehen, um eine für den entsprechenden Standort optimale Energieversorgung wählen zu können. [BMVBS 2011] und [Fisch et al. 2012] sehen dies ähnlich, so dass Gebäude mit Energiegewinn nicht ausschließlich auf den Energieträger Strom reduziert werden.

Im folgenden Kapitel werden zuerst unterschiedliche Techniken zur Wärmeerzeugung im PH+E beschrieben, anschließend die Möglichkeiten der Stromerzeugung unter Berücksichtigung der besonderen Randbedingungen von Gebäuden in städtischen Lagen.

4.1 Wärmeerzeugung

Für die Wärmeerzeugung eines Passivhauses mit Energiegewinn kommen verschiedene Anlagentechniken in Betracht. Gängige Anlagentechniken auf Basis regenerativer Energieträger sind Solarthermie, Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke. Verschiedene, zurzeit am Markt verfügbare Techniken sowie aktuelle Entwicklungen, werden in diesem Kapitel vorgestellt. Die Auswirkungen ihres Einsatzes auf die Energiebilanz des Gebäudes werden im Anschluss in Kapitel 5 untersucht.

4.1.1 Wärmepumpen

Wärmepumpen sind die aktuell am häufigsten genutzte Technologie zur Wärmeerzeugung in Gebäuden mit Energieüberschuss. Insbesondere bei kleinen Gebäuden lässt sich auf diese Weise in Kombination mit großen Photovoltaik-Flächen ein Energiegewinn vergleichsweise einfach realisieren. Wärmepumpen nutzen Umweltwärme, bringen diese mithilfe von elektrischer Antriebsenergie auf ein höheres Temperaturniveau und können so die benötigten Temperaturen für Heizung und Warmwasser bereitstellen. Als gängige Wärmequellen werden Außenluft, Erdreich und Grundwasser genutzt. Bild 23 stellt die Funktion einer Wärmepumpe schematisch dar.

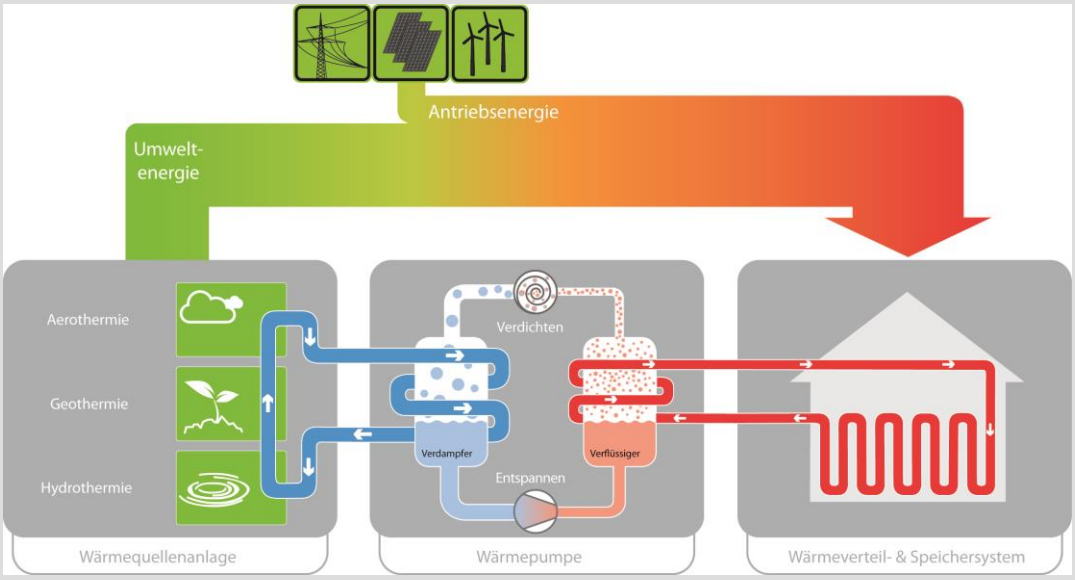


Bild 23: Funktion der Wärmepumpe – schematische Darstellung

Quelle: Bundesverband Wärmepumpe e.V.

Die Effizienz von Wärmepumpen kann durch die Arbeitszahl (AZ) beschrieben werden, sie drückt das Verhältnis von erhaltener Wärme und zugeführter elektrischer Energie aus:

$$AZ = \frac{erhaltene\ Wärme}{zugeführte\ elektrische\ Energie}$$

Die Arbeitszahl ist im Wesentlichen abhängig vom Temperaturniveau der Wärmequelle und der Systemtemperatur[6], bzw. des Temperaturniveaus auf dem die Wärme benötigt wird. Ziel ist es, das Temperaturniveau der benötigten Wärme möglichst niedrig zu halten. So sind Wärmepumpen, die mit einer Flächenheizung mit niedriger Vorlauf-Temperatur (z. B. max. 35 °C) genutzt werden, deutlich effizienter als bei Nutzung für die Warmwasserbereitung auf hohem Temperaturniveau (bis zu 60 °C). Eine möglichst geringe Differenz zwischen Wärmequelltemperatur und Systemtemperatur ist entscheidend für die Effizienz der Wärmepumpe. Bei Gebäuden mit Energiegewinn werden Wärmepumpen meist für Heizung und Warmwasser genutzt. Die Systemtemperatur liegt daher abhängig von der Jahreszeit und dem sich dadurch ergebenden Anteil von Heizwärme und Warmwasser an der benötigten Wärme in unterschiedlichen Bereichen.

Dementsprechend schwankt auch die Arbeitszahl im Jahresverlauf, abhängig von der Differenz zwischen Wärmequelltemperatur und der Systemtemperatur. Bei unterschiedlichen Wärmepumpenarten erfolgt diese Schwankung in verschiedenen Zyklen: Außenluftwärmepumpen erzielen in den Sommermonaten aufgrund hoher Außenlufttemperaturen höhere Arbeitszahlen als im Winter. Erdreich-Wärmepumpen erzielen dagegen im Winter höhere Arbeitszahlen als im Sommer, da ihre Wärmequelltemperatur über das Jahr nahezu gleich bleibt, die Systemtemperaturen jedoch in den Wintermonaten, aufgrund des höheren Anteils an Heizwärme auf niedrigerem Temperaturniveau liegt (vgl. [Miara et al. 2011]). Zum Vergleich verschiedener Wärmepumpen sollten daher Arbeitszahlen über längere Zeiträume verglichen werden, zumindest über ein gesamtes Jahr. Dieser Wert wir Jahresarbeitszahl (JAZ) genannt.

[6] Mittelwert aus Vor- und Rücklauftemperatur bei Beheizung, Warmwassertemperatur bei Warmwasserbereitung

In der Studie „Wärmepumpen Effizienz“ haben [Miara et al. 2011] verschiedene Wärmepumpenanlagen im realen Betrieb messtechnisch über mehrere Jahre untersucht und durchschnittliche Jahresarbeitszahlen unter Verwendung verschiedener Bilanzgrenzen ermittelt (vgl. Bild 24). Die Bilanzgrenze wird dabei von der Kategorie Arbeitszahl AZ 0 hin zur AZ 3 immer weiter gefasst. Während bei der AZ 0 lediglich die abgegebene Wärme der Wärmepumpe im Verhältnis zum Elektroenergieverbrauch des Verdichters und der Steuerung betrachtet wird, werden bei den weiteren Arbeitszahlen immer mehr Verbräuche einzelner Komponenten zusätzlich erfasst: in AZ 1 zusätzlich Ventilator/ Solepumpe/ Brunnenpumpe, in AZ 2 zusätzlich der Verbrauch des Heizstabes und in AZ 3 zusätzlich der Verbrauch der Ladepumpen. Die Arbeitszahl 3 stellt daher die umfassendste Betrachtung der Wärmepumpe dar.

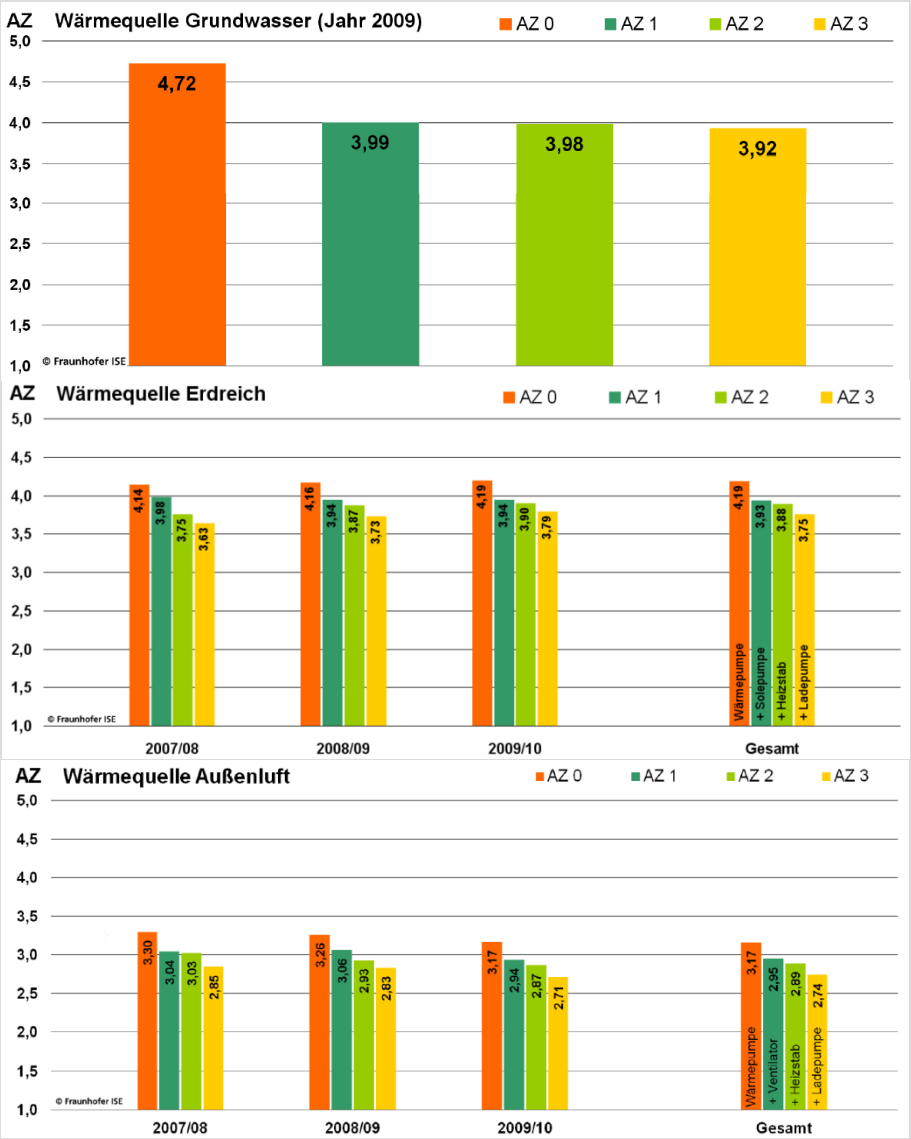


Bild 24: Gemessene Jahresarbeitszahlen verschiedener Wärmepumpentypen

Quelle: [Miara et al. 2011]

Grundlage des sehr umfangreichen Messprojektes sind Einfamilienhäuser. Vermessen wurden 3 Wärmepumpen mit der Wärmequelle Grundwasser, 56 Wärmepumpen mit der Wärmequelle Erdreich und 18

Wärmepumpen mit der Wärmequelle Luft. Die Mittelwerte der Jahresarbeitszahl liegen für die Wärmequelle Grundwasser bei 3,92, für Erdreich bei 3,75 und für Außenluft als Wärmequelle bei 2,74 (jeweils Bilanzgrenze AZ 3). Ob vergleichbare Jahresarbeitszahlen wie die hier gemessenen Werte auch bei Mehrfamilienhäusern erzielt werden können ist fraglich, da es bei Mehrfamilienhäusern schwieriger ist, im Betrieb entsprechend geringe Systemtemperaturen sicherzustellen.

Grundlage des Einsatzes von Wärmepumpen zur Beheizung von Gebäuden sind große Heizflächen, meist Fußbodenheizungen, da dadurch die Systemtemperatur für den Anteil Heizwärme deutlich reduziert werden und somit die Wärmepumpe effizienter arbeiten kann. Die Schwierigkeit besteht darin, insbesondere bei Mehrfamilienhäusern auch das Temperaturniveau für die Warmwasserbereitung möglichst gering zu halten. Während bei Einfamilienhäusern an das Temperaturniveau der Warmwasserbereitung keine Anforderungen gestellt werden, schreibt die DVGW-Richtlinie bei Mehrfamilienhäusern hohe Systemtemperaturen von 60 °C vor. Diese können durch die in Kapitel 3.3 beschriebenen Technologien reduziert werden. Trotzdem ist davon auszugehen, dass in den meisten Fällen in Mehrfamilienhäusern höhere Warmwassertemperaturen vorliegen als in Einfamilienhäusern. Dies ist einerseits bedingt durch längere Warmwasserverteilleitungen und die dadurch bedingten höheren Leitungsverluste. Andererseits ist sie in vielen Fällen durch eine nicht optimale Betriebsführung der Anlagen verursacht, die sich leider häufig darin zeigt, dass bei Problemen mit der Warmwasserbereitung zuerst die Temperatur erhöht wird.

Weiterhin ist zu bedenken, dass an manchen Standorten Bohrungen für Erdreich-Sonden oder auch Grundwasser-Wärmepumpen nicht genehmigungsfähig sind und somit nicht jeder Wärmepumpentyp an jedem Standort genutzt werden kann. Tabelle 8 stellt die wichtigsten standortabhängigen und standortunabhängigen Einflussgrößen auf die Effizienz von Wärmepumpen zusammenfassend dar.

Tabelle 8: Einflussgrößen auf die Effizienz von Wärmepumpen

Standortabhängige Einflussgrößen	Standortunabhängige Einflussgrößen
Wärmequellentemperatur (Außenluft, Erdreich, Grundwasser) am Standort des Gebäudes	**Systemtemperatur** im Gebäude: große Flächenheizungen mit niedrigen Vorlauftemperaturen und geringe Warmwassertemperaturen sind für die Effizienz von Wärmepumpen besonders wichtig
Art der erschließbaren Wärmequellen (teilweise sind Erdreich- und Grundwasserwärmepumpen nicht genehmigungsfähig)	Einbindung der Wärmepumpe in die Anlagentechnik, Regelung der Anlagentechnik

In Abhängigkeit von dem Gebäude, seinem Energiebedarf, dem Standort und den Kosten (Anschaffung und Betrieb) sollte die geeignete Wärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Grundwasser) gewählt werden.

Auch wenn die Übertragbarkeit der in [Miara et al. 2011] gemessenen Jahresarbeitszahlen für Wärmepumpen von Einfamilienhäusern auf Mehrfamilienhäuser nicht abschließend sichergestellt werden kann, können diese Werte als Anhaltswerte für die Größenordnungen möglicher Arbeitszahlen verwendet werden. Die Beispielrechnungen in Kapitel 5 werden daher anhand verschiedener Jahresarbeitszahlen durchgeführt, die den von [Miara et al. 2011] ermittelten Wertebereich umfassen. Als Referenzgröße wird für die Beispielrechnungen eine Jahresarbeitszahl von 3,5 angenommen, dies entspricht etwa einer Wärmepumpe mit der Wärmequelle Erdreich.

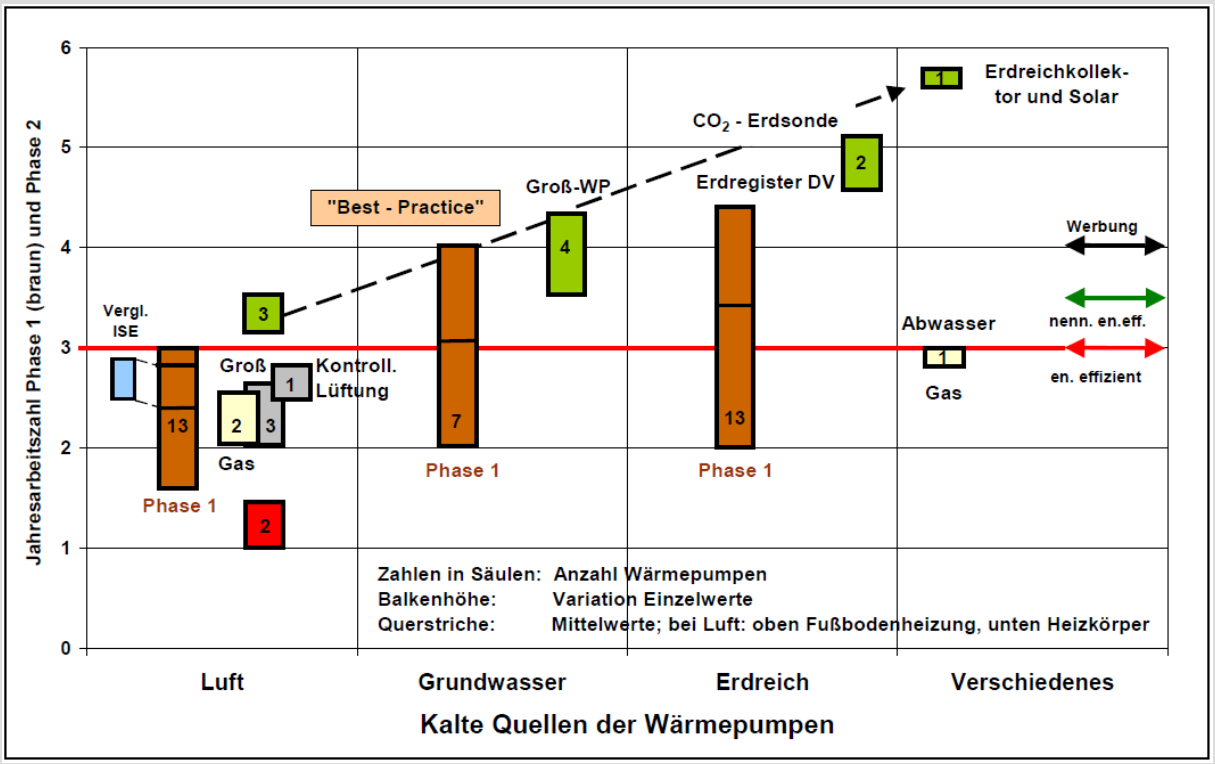


Bild 25: Messergebnisse einer 7 jährigen Praxisuntersuchung zur Effizienz von Wärmepumpen

Quelle: [Auer, Schote 2014]

Bild 25 zeigt die Messergebnisse von [Auer, Schote 2014] zu einem langjährigen Praxistest verschiedener Wärmepumpentypen. Insgesamt zeigt sich eine sehr große Streuung der Messergebnisse. Auch Grundwasserwärmepumpen und Erdreichwärmepumpen, die in der Theorie hohe Jahresarbeitszahlen liefern können, zeigten im Praxistest teilweise eher geringe Jahresarbeitszahlen. Gründe für die niedrigen Werte lagen meist in den im Verhältnis zur Planung veränderten Randbedingungen z. B. höherer Wärmebedarf des Gebäudes, höheren Systemtemperaturen, zu häufiger Einsatz des Elektroheizstabes, u.v.m.. Dies zeigt wie wichtig es ist diese Randbedingungen bereits in der Planung im Detail zu betrachten. Weiterhin zeigten die Untersuchungen von [Auer, Schote 2014] jedoch auch welche Potenziale in den aktuell in der Forschung befindlichen Neuerungen zu Wärmepumpen enthalten sind. So kommt in der Studie der horizontale Erdkollektor mit einer Direktverdampfung des Wärmepumpen-Kältemittels auf eine Systemjahresarbeitszahl von 4,7, die CO2-Erdsonde auf 5,1 und der solarunterstützte Erdkollektor auf 5,8.

4.1.2 Aktuelle Entwicklungen bei Wärmepumpen

Im Bereich der Wärmepumpen-Technologie gibt es zurzeit viele Entwicklungen zur höheren Effizienz. So werden die Nutzung weiterer Wärmequellen wie z. B. Abwasserwärme oder Eisspeicher verstärkt vorangetrieben, aber auch die technologische Weiterentwicklung zu höheren Jahresarbeitszahlen insbesondere von Luftwärmepumpen auf Jahresarbeitszahlen größer vier (vgl. [BINE 2013]) oder auch die Nutzung von CO_2-Sonden zur Erhöhung der Effizienz von Erdreich-Wärmepumpen. In der Praxis wird die Kombination von solarthermischen Anlagen und Wärmepumpen bereits häufig eingesetzt, dennoch wird sie in unterschiedlichen Varianten weiter erforscht und im Feldtest erprobt. Weitere Entwicklungen gibt es im Bereich der

Smart Grid-Fähigkeit und der Schallreduktion von Wärmepumpen. Verschiedene Ansätze werden im Folgenden kurz beschrieben.

Nutzung von Abwasserwärme

Abwasser bietet mit Temperaturen, die im Jahresverlauf zwischen 9 °C und 20 °C schwanken (vgl. [LfU 2013]) optimale Temperaturrandbedingungen zur Nutzung als Wärmequelle für Wärmepumpen. Dabei eignet sich die Nutzung von Abwasserabwärme besonders für große Gebäude (vgl. [BWP 2005]) mit entsprechender Heizleistung auf möglichst niedrigem Temperaturniveau. Wesentliche Einflussgrößen auf die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit sind die Nähe des Gebäudes zum Kanal, die Bebauungsdichte, die Systemtemperaturen im Gebäude sowie auf Seiten des Kanals die Wassermenge und die Temperatur des Abwassers, um nur die wichtigsten zu nennen. Bild 26 zeigt exemplarisch Abwasserwärmeübertrager für den Neubau eines Kanals (links), sowie den nachträglichen Einbau in bestehende Kanäle (rechts).

Bild 26: Abwasserwärmeübertrager für Neueinbau (links) und Einbau in bestehende Kanäle (rechts)

Quelle: www.rabtherm.com

Wärmepumpe mit Eisspeicher

Vorteil des Eisspeichers ist der Betrieb auf sehr niedrigem Temperaturniveau. Auf diese Weise ist eine saisonale Speicherung von Wärme aus dem Sommer zur Nutzung im Winter möglich.

Die Wärmepumpe nutzt die Wärme aus dem Speicher im Winter zur Beheizung und Warmwasserbereitung. Dabei kühlt sie das im Speicher vorhandene Wasser bis unter den Gefrierpunkt ab. Im Sommer wird der Eisspeicher dann durch Kühlung des Gebäudes oder auch durch Einbringung solarthermischer Wärme auseinfachsten Solarkollektoren wieder aufgetaut und regeneriert. Bild 27 zeigt die vereinfachte Anlagenskizze des Systems sowie das Innenleben des Eisspeichers und einen Solarkollektor zur Regeneration des Speichers. Wesentliche Vorteile dieses Konzeptes sind, dass Bohrungen für Sonden entfallen, jedoch trotzdem aufgrund des Speichers eine höhere Wärmequelltemperatur erschlossen werden kann als mit einer Luftwärmepumpe. Zusätzlich könnte dieses Konzept zur Gebäudekühlung mit geringem Hilfsstromeinsatz verwendet werden.

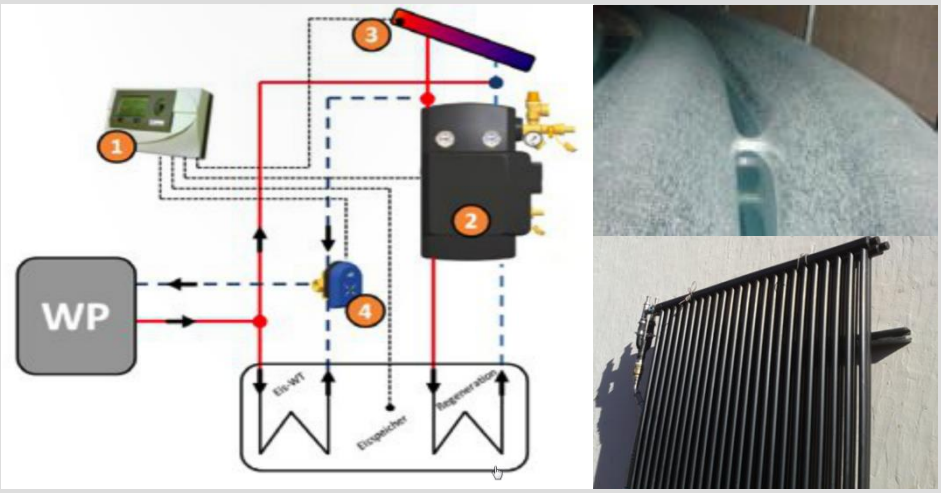


Bild 27: Schema des Eisspeichers mit Wärmepumpe (links), Innenleben eines Eisspeichers (oben rechts), Solarkollektor zur Regeneration (unten rechts)

Quelle: www.isocal.de

CO_2-Sonden mit Direktverdampfung

Bei dieser Technologie werden statt gewöhnlichen Erdreich-Sonden mit Sole als Wärmeträger, Sonden mit CO_2 als Arbeitsmedium genutzt. Unter hohem Druck verdampft das CO_2 bei Wärmeaufnahme aus dem Erdreich und kann direkt als Kältemittel in der Wärmepumpe genutzt werden. Vorteile dieser Direktverdampfung, wie dieser Vorgang genannt wird, sind, dass ein Wärmeübertrager zwischen der üblichen Sole und dem Arbeitsmedium der Wärmepumpe entfällt, zusätzlich entfällt die Solepumpe. Die Energieeffizienz kann in der Folge deutlich gesteigert werden, es werden Jahresarbeitszahlen größer 5 in Aussicht gestellt. Nachteil sind die zurzeit noch hohen Kosten, da für die Sonde ein Edelstahl- oder Kupferrohr verwendet werden muss, statt der Kunststoffrohre, die für den Sole-Betrieb ausreichend sind.

Kombination solarthermischer Anlagen mit Wärmepumpen

Je nach Anlagenhydraulik können sich aus der Kombination von solarthermischen Anlagen und Wärmepumpe Effizienzvorteile für die Wärmpumpe und/oder die solarthermische Anlage ergeben. Es gibt sehr viele verschiedene Anlagenkonfigurationen, die solarthermische Anlage wird meist als vorrangige Wärmequelle genutzt. Als weitere typische Funktionen dieser Systeme nennt [Loose 2012]:

„ *- Nahezu 100 % solare Trinkwassererwärmung im Sommer*
- Solare Heizungsunterstützung in Übergangszeiten
- Wärmepumpe dient aus Zusatzwärmequelle für die Solaranlage in den Übergangszeiten
- Im Winter primär Heizung mit der Wärmepumpe
- Im Sommer Kühlung über Wärmepumpe möglich“[7]

Bild 28 zeigt verschiedene Anlagenbeispiele zur Kombination von solarthermischer Anlage und Wärmepumpe. Als wesentliche Komponenten der Anlagenbeispiele sind der solarthermische Kollektor, die Wärmepumpe (gelb), die Heizung und der Pufferspeicher dargestellt.

[7] Die Autoren merken zum Thema Kühlung an, dass (Wohn-)Gebäude so geplant werden sollten, dass keine aktive Kühlung benötigt wird, auch wenn im Sommer ggf. Photovoltaik-Strom im „Überschuss“ zur Verfügung steht.

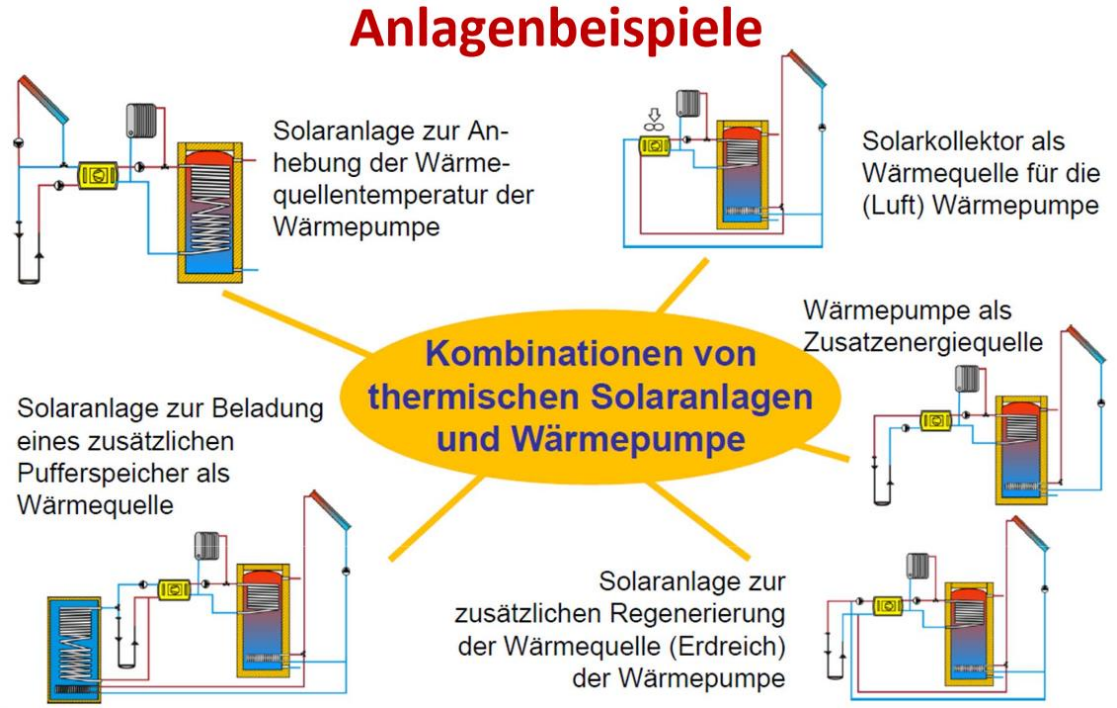


Bild 28: Anlagenbeispiele der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen

Quelle: [Loose 2012]

Folgende Vorteile können sich nach [Loose 2012] daraus ergeben: Für die solarthermische Anlage können sich z. B. höhere Kollektor-Wirkungsgrade aufgrund niedriger Betriebstemperaturen ergeben, wenn die Wärmepumpe als Wärmesenke genutzt wird. Da auch niedrige Temperaturniveaus in den Übergangszeiten sinnvoll genutzt werden können, kann sich ein höherer Kollektorertrag aufgrund der längeren Betriebszeiten einstellen, somit steigt der solare Deckungsanteil an der Wärmeerzeugung. Auf Seiten der Wärmepumpe kann z. B. bei Nutzung der solarthermischen Anlage zur Erhöhung der Wärmequellentemperatur eine Steigerung der Jahresarbeitszahl erreicht werden. Zusätzlich kann die Wärmepumpe bei der Erwärmung des Trinkwassers, die aufgrund des hohen Temperaturniveaus für diese einen ungünstigen Betriebszustand darstellt, zumindest in den Sommermonaten sehr gut durch die solarthermische Anlage entlastet werden.

Smart Grid-Fähigkeit von Wärmepumpen

Wärmepumpen können positive, sowie auch negative Auswirkungen auf das elektrische Netz haben. Die Regelung von Wärmeerzeugern erfolgt für gewöhnlich auf Basis des aktuell vorliegenden Wärmebedarfs. Dies kann dazu führen, dass bei gleichzeitigem Einschalten vieler Wärmepumpen Lastspitzen im elektrischen Netz erzeugt werden. Der Einfluss von Wärmepumpen auf das elektrische Netz kann jedoch auch positiv zum Ausgleich der aktuellen Last im Netz genutzt werden. So können Wärmepumpen bei gezielter Ansteuerung bei Spitzenlasten durch Abschalten das Netz entlasten und zu Zeiten erhöhter Einspeisung durch gezieltes Anschalten überschüssige Energie aufnehmen. Voraussetzung ist ein ausreichend groß dimensionierter Pufferspeicher.

Bereits über 300 verschiedene Wärmepumpen wurden mit dem Label „SG Ready“ (siehe [BWP 2013]) ausgezeichnet. In diesen Wärmepumpen wurden spezielle Regler verbaut, durch den die Wärmepumpe auf Signale aus dem Smart Grid reagieren kann. Ziel einer durch das Smart Grid beeinflussten Betriebsweise der Wärmepumpe ist es, dadurch einerseits Kosten für den Nutzer zu sparen, andererseits das elektrische Netz zu entlasten. Die mit diesem Label ausgezeichneten Wärmepumpen müssen je nach Art (Hei-

zungswärmepumpe/Warmwasserwärmepumpe) unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Für Heizungswärmepumpen gibt es vier Betriebszustände (vgl. [BWP 2013]), die durch das Smart Grid ausgelöst werden können. Im ersten Betriebszustand wird die Wärmepumpe für maximal 2 Stunden vom EVU gesperrt, im zweiten Betriebszustand läuft die Wärmepumpe im energieeffizienten Normalbetrieb. Im dritten Betriebszustand wird ein verstärkter Betrieb für Raumheizung und Warmwasser empfohlen, jedoch nicht vom Smart Grid vorgegeben, und im vierten Betriebszustand wird die Wärmepumpe durch den Befehl aus dem Smart Grid aktiv eingeschaltet. Je nach Nutzungsmodell kann auch die elektrische Zusatzheizung aktiv eingeschaltet werden, optional kann zusätzlich eine höhere Temperatur in Wärmespeichern zugelassen werden. Für Warmwasserwärmepumpen gilt lediglich die Anforderung, dass eine automatische Ansteuerung die Warmwasser-Solltemperatur erhöhen können muss, so dass auf diese Weise eine thermische Speicherung möglich wird.

Auch wenn die Smart Grid-Funktion von Wärmepumpen häufig noch nicht genutzt wird, gibt es bereits Hersteller, die ähnliche Funktionen für das „Hausnetz“ umgesetzt haben. Bei Gebäuden, die zusätzlich zu einer Wärmepumpe eine Photovoltaikanlage besitzen, können Wärmepumpen so geregelt werden, dass sie sich vorrangig bei hoher Stromerzeugung durch die Photovoltaikanlage einschalten. Auf diese Weise wird dieser Strom direkt, ohne Einspeisung in das elektrische Netz verbraucht. Der Eigenverbrauch des Gebäudes steigt und die Nutzer können Stromkosten sparen.

4.1.3 Solarthermie

Solarthermische Anlagen haben den Vorteil, dass die solare Wärme im Gegensatz zu anderen Wärmeerzeugern (Wärmepumpe, BHKWs, Heizkessel) nahezu ohne Einsatz eines anderen Energieträgers erzeugt werden kann. Es wird lediglich etwas elektrische Hilfsenergie für Pumpen und Regelung benötigt. Auch der Herstellungsenergieaufwand solarthermischer Anlagen ist vergleichsweise gering, so dass sich sehr geringe Primärenergiefaktoren von 0,031 kWh/kWh für Flachkollektoren und 0,045 kWh/kWh für Vakuumröhrenkollektoren ergeben (berechnet mit Gemis 4.8). Dies macht sie für den Einsatz im Passivhaus mit Energiegewinn interessant.

In Bild 29 sind gängige Kollektorarten, die für die Warmwasserbereitung und Gebäudebeheizung eingesetzt werden, dargestellt. Sie unterscheiden sich in der Art der Wärmeaufnahme, der Effizienz, den erzielbaren Temperaturniveaus und den Kosten.

Flachkollektoren sind bereits sehr lange erprobt, zuverlässig und die günstigste Variante der dargestellten Kollektoren. Vakuumröhrenkollektoren sind aufgrund geringerer Wärmeverluste durch die Nutzung des „Prinzips Thermoskanne“ effizienter als Flachkollektoren. Die Energieerträge dieser Kollektoren können durch die Verwendung eines CPC-Reflektors (Compound Parabolic Concentrator) hinter den Vakuumröhren erhöht werden, da auf diese Weise auch Solarstrahlung, die nicht direkt auf die Vakuumröhre trifft, durch den Spiegel auf die Röhre geleitet und somit zusätzlich zur Wärmeerzeugung genutzt wird. Die Effizienz der unterschiedlichen Kollektoren und der Zusammenhang zwischen der Art des Kollektors und den erzielbaren Temperaturen sind im Diagramm in Bild 30 detailliert dargestellt.

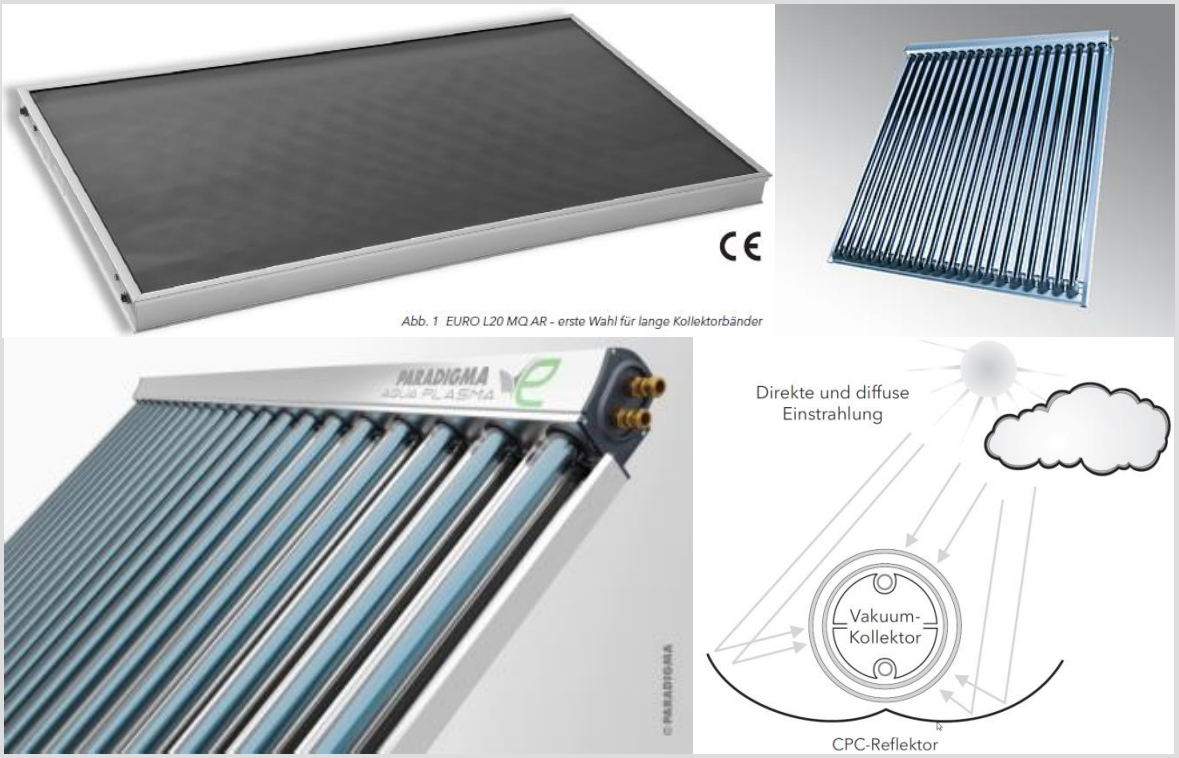


Bild 29: Solarthermie – Kollektorarten: Flachkollektor (oben links), Vakuumröhrenkollektor (oben rechts), Vakuumröhrenkollektor mit CPC-Reflektor (unten links), Funktion des Vokuumröhrenkollektor mit CPC-Reflektor (unten rechts)

Quellen: www.wagner-solar.com, www.rittersolar.de, www.paradigma.de, [Schreier et al. 2005]

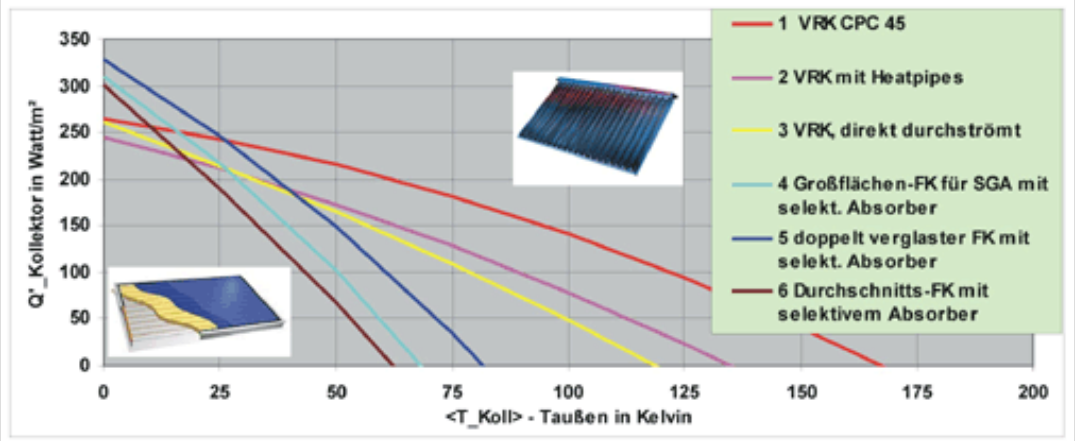


Bild 30: Solarthermie: Kollektorkennlinien verschiedener Kollektortypen

Quelle: [Abrecht et al 2008]

Während Flachkollektoren bei einer geringen Temperaturdifferenz zwischen Kollektor- und Außentemperatur besonders effizient arbeiten – leider jedoch in einem meist nur wenig nutzbaren Temperaturbereich, lässt sich mit Vakuumröhrenkollektoren auch bei steigenden Differenzen zwischen Kollektor- und Außentemperatur eine hohe Wärmeleistung erzielen. Da dies mit höheren erzielbaren Kollektortemperaturen einhergeht, eignen sich Vakuumröhrenkollektoren, insbesondere die Variante mit CPC-Reflektor, auch für Anwendungen, bei denen hohe Temperaturen benötigt werden. Insgesamt ist der Wärmeertrag pro m² Kollektorfläche des Vakuumröhrenkollektors mit CPC-Reflektor in dem Temperaturbereich, der im Gebäude für Beheizung und Warmwasserbereitung benötigt wird (50 - 75 °C), am höchsten.

Welche Kollektoren sich für den Einsatz im jeweiligen Gebäude eignen, ist abhängig von der Zielsetzung. Während Flachkollektoren eine verhältnismäßig günstige Variante darstellen, sind Röhrenkollektoren, insbesondere die Variante mit CPC-Spiegel meist teurer, haben aber einen deutlich höheren Ertrag pro m² Kollektorfläche. Für ein Mehrfamilienhaus als Passivhaus mit Energiegewinn eignet sich daher der effizienteste aller Kollektoren. Die bestmögliche Ausnutzung der geringen zur Verfügung stehenden (Dach-) Flächen zur solaren Energieerzeugung pro m² Wohnfläche ist notwendig, damit das Gebäude einen Energieüberschuss erzielen kann. Zusätzlich steht die solarthermische Anlage in Flächenkonkurrenz zu der Photovoltaikanlage, die zur Deckung des elektrischen Energiebedarfs benötigt wird. Auch aus diesem Grund ist es wichtig, möglichst effiziente Kollektoren zu verwenden, um nach Installation der solarthermischen Anlage noch ausreichend Fläche für die elektrische Energieerzeugung durch Photovoltaik zur Verfügung zu haben.

Um eine möglichst hohe Effizienz der solarthermischen Anlage zu erzielen, ist es zusätzlich notwendig, diese in Ausrichtung (optimal ist eine Südausrichtung) und Neigung auf den Anwendungsfall bezogen zu optimieren. Im Gegensatz zu Photovoltaikanlagen, die in das elektrische Netz einspeisen können und somit nicht auf einen Abgleich von Erzeugung und Bedarf angewiesen sind, muss bei solarthermischen Anlagen die Wärmeerzeugung und -speicherung auf den Wärmebedarf abgestimmt optimiert werden. Durch die Neigung kann auf den Zeitpunkt der Erzeugung der solaren Wärme Einfluss genommen werden. Anlagen mit geringer Neigung erzeugen sehr hohe Erträge im Hochsommer. Anlagen mit einer hohen Neigung erzeugen im Hochsommer etwas geringere Erträge, können aber auch in der Übergangszeit noch wesentlich zur Wärmeerzeugung und damit gegebenenfalls zur Heizungsunterstützung beitragen. Je höhere Deckungsgrade mit der solarthermischen Anlage erreicht werden sollen, umso größere Anlagen mit stärkerer Neigung müssen installiert werden.

Wesentlichen Einfluss auf den energieeffizienten Betrieb der solarthermischen Anlage und die Erreichung der beabsichtigten Deckungsgrade haben zusätzlich zu der Art der Kollektoren die Größe des Pufferspeichers, die Einbindung der Puffer in die Anlagenhydraulik und die Regelung. Diese Komponenten sollen hier nicht detailliert dargestellt, sondern nur kurz exemplarisch erläutert werden. Bild 31 zeigt beispielhaft das Anlagenschema mit solarthermischer Anlage und großen Pufferspeichern, wie es in dem Modellgebäude „Passivhaus mit Energiegewinn Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main“ umgesetzt wurde.

Die solarthermische Anlage mit hocheffizienten CPC-Röhrenkollektoren speist aufgrund der hohen im Kollektor erzielbaren Vorlauftemperaturen zum größten Teil der Zeit in den oberen Bereich des Speichers ein. Können nur geringe Temperaturen erzielt werden, speist diese im unteren Bereich des Speichers ein. Der Rücklauf, der zum solarthermischen Kollektor geführt wird, kommt aus dem untersten, kältesten Teil des Pufferspeichers. Je kälter diese Rücklauftemperatur ist, umso höhere Erträge können aus der solarthermischen Anlage erzielt werden. Die in Bild 31 dargestellte Anlage arbeitet vorrangig zum zusätzlichen Wärmeerzeuger, die gesamte Wärme wird in zwei großen Pufferspeichern gespeichert. Bei Wärmebedarf wird die Wärme an das Heizsystem und die Frischwasserstation zur Warmwasserbereitung geleitet. Vorteil des hier dargestellten Anlagenschemas ist, dass die solarthermisch erzeugte Wärme aufgrund des Zeitpunktes ihrer

Erzeugung zwar hauptsächlich zur Warmwasserbereitung genutzt wird, jedoch kann sie in der Übergangszeit auch zur Deckung des Heizwärmebedarfs des Gebäudes beitragen.

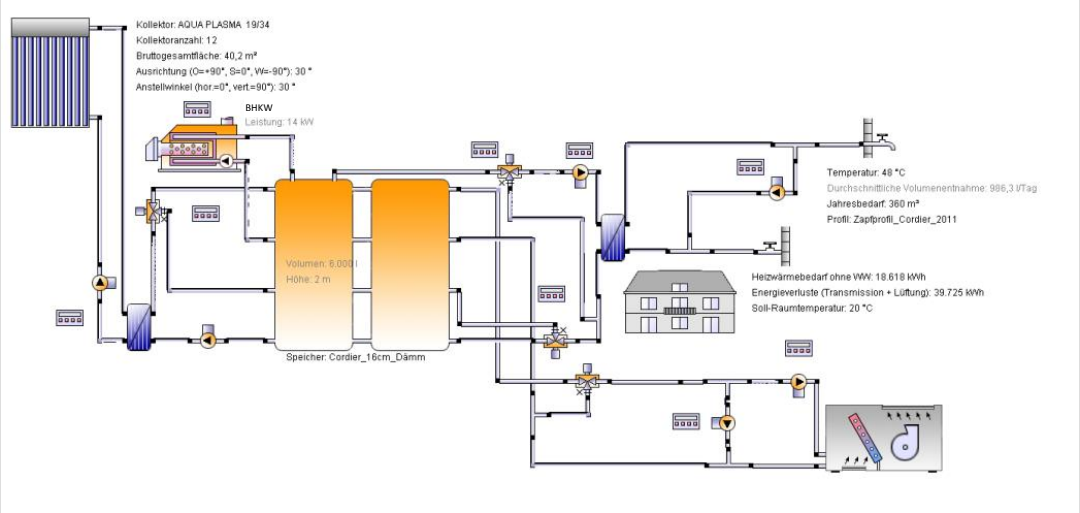


Bild 31: Anlagenschema für eine Simulation mit CPC-Kollektoren und zwei Pufferspeichern

Quelle: Vela Solaris AG/ Simulationsprogramm Polysun

Es gibt viele weitere Möglichkeiten, die Anlagenhydraulik unter Einbeziehung solarthermischer Wärme zu gestalten. So gibt es Konzepte, die anstelle der hier dargestellten Frischwasserstation einen Warmwasserspeicher nutzen oder auch Konzepte, bei denen die solarthermische Anlage direkt auf einem Warmwasserspeicher arbeitet, um nur zwei zu nennen. Essentiell für eine möglichst große Effizienz all dieser Konzepte bei hohen zu erzielenden Deckungsgraden ist die Planung der Anlage anhand der speziellen Randbedingungen des Gebäudes. Tabelle 9 stellt die standortabhängigen und standortunabhängigen Einflussgrößen auf den Ertrag der solarthermischen Anlage zusammenfassend dar.

Tabelle 9: Einflussgrößen auf den Ertrag solarthermischer Anlagen

Standortabhängige Einflussgrößen	Standortunabhängige Einflussgrößen
Solare Einstrahlung am Standort des Gebäudes	Effizienz/Erträge pro m² Kollektorfläche der solarthermischen Kollektoren (Abhängig von der Art der Kollektoren – Flachkollektor, Vakuumröhrenkollektor, CPC-Kollektoren) und Größe des Pufferspeichers
Gebäudeausrichtung	Bestmögliche Ausnutzung der vorhandenen Flächen
Dachausrichtung (falls kein Flachdach)	Optimierungsmöglichkeiten bei der Neigung der Kollektoren
Verschattung der verfügbaren Flächen	Rücklauftemperatur, die der solarthermischen Anlage zur Verfügung steht (je geringer die Rücklauftemperatur, umso höher die Effizienz der Anlage)
	Einbindung der solarthermischen Anlage in die Anlagentechnik, Abstimmung der einzelnen Komponenten aufeinander und Regelkonzept

4.1.4 Blockheizkraftwerke

Blockheizkraftwerke (BHKW) erzeugen gleichzeitig Strom und Wärme und nutzen damit den verwendeten Brennstoff besonders effizient. Mit Wirkungsgraden von insgesamt bis zu 90 %, bei Brennwertnutzung auch höher, ist ihre Energieeffizienz deutlich größer als die von Großkraftwerken zur elektrischen Energieerzeugung und einem zusätzlichen Heizkessel, selbst wenn bei den Kraftwerken die Abwärme genutzt werden kann. Werden dezentrale BHKWs für einzelne Gebäude oder Gebäudegruppen eingesetzt, entstehen bei kompakten Nahwärmenetzen in den meisten Fällen nur geringe Wärmeverluste. Dadurch kann die Wärme dieser BHKWs nicht nur effizient erzeugt, sondern auch effizient genutzt werden. Der Einsatz regenerativer Energieträger in BHKWs macht sie durch ihre sehr effiziente Nutzung der Energieträger für das Passivhaus mit Energiegewinn interessant.

Bild 32 verdeutlicht die Energieeffizienz der gemeinsamen Erzeugung von Wärme und Strom in einem BHKW gegenüber der getrennten Erzeugung.

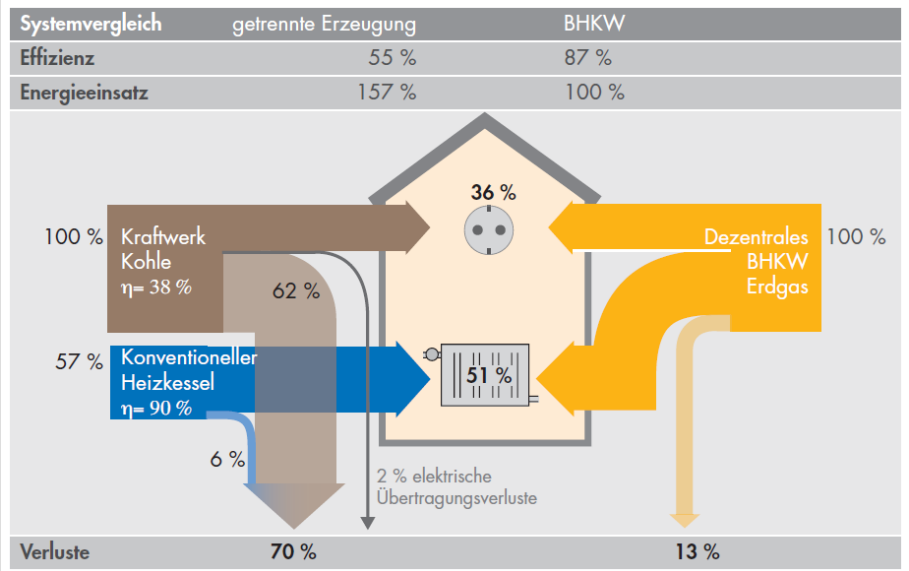


Bild 32: Energieeffizienz durch Kraft-Wärme-Kopplung

Quelle: [ASUE 2010]

BHKWs gibt es in vielen verschiedenen Größenordnungen, die für unterschiedliche Anwendungen verwendet werden. Tabelle 10 ordnet die verschiedenen Größen anhand ihrer elektrischen Leistungen den aktuell gängigen Bezeichnungen und ihren Hauptanwendungsgebieten zu. Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn fallen hier bei der Versorgung eines einzelnen Gebäudes unter das Leistungsspektrum „bis 15 kW_{el}“ oder „bis 50 kW_{el}“. Aufgrund des geringen Heizwärmebedarfs durch Bauweise im Passivhausstandard sind bei entsprechender Anlagenhydraulik unter Verwendung großer Pufferspeicher Mikro-KWK-Anlagen in Größenordnungen ausreichend, die üblicherweise für 1- bis 2-Familienhäuser eingesetzt werden (vgl. [Schaede, Großklos 2013]).

Tabelle 10: Größen von Blockheizkraftwerken (BHKW)

Bezeichnung	Leistungsspektrum	Hauptanwendungsbereiche
„große“ BHKW	2 MW_{el} bis 20 MW_{el}	Fernwärme, Industrie
„kleine“ BHKW	50 kW_{el} bis 2 MW_{el}	Nahwärme, Versorgung großer Gebäudekomplexe sowie in Industrie und Gewerbe
Mini-BHKW	**bis 50 kW_{el}**	**Einzelobjektversorgung von Mehrfamilienhäusern und anderer mittelgroßer Gebäude**
Mikro-KWK-Anlage, „stromerzeugende Heizung“	bis 15 kW_{el}	Einzelobjektversorgung für Ein- und Mehrfamilienhäuser, kleine und mittlere Gewerbebetriebe und andere kleine Gebäude

Quelle: [Hörner 2010]

Aktuell werden am häufigsten BHKWs mit Ottomotor eingesetzt, die im Folgenden beschrieben werden sollen. Bild 32 zeigt die schematische Darstellung eines solchen BHKWs.

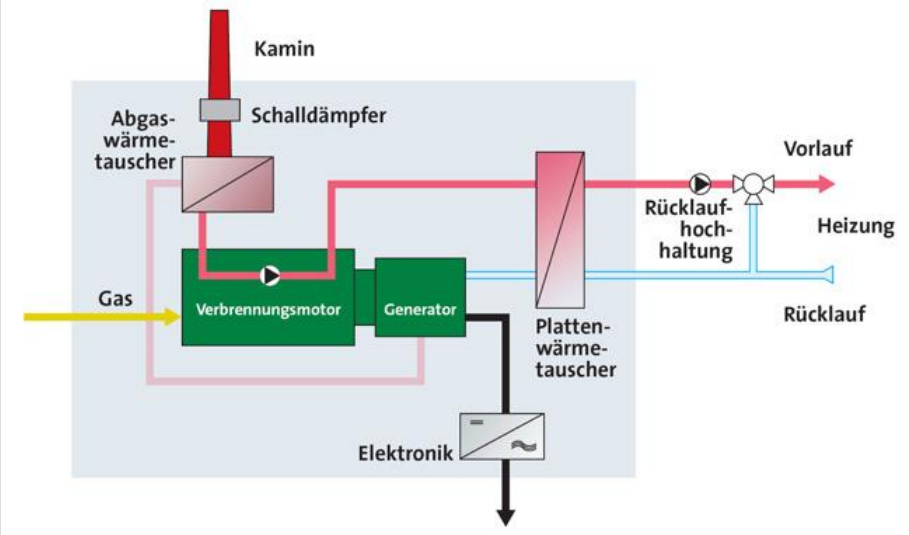


Bild 33: Anlagenschema eines BHKWs mit Abgaswärmeübertrager

Quelle: [ecopower]

Der auf Dauerbetrieb ausgelegte Verbrennungsmotor wird an einen Generator angeschlossen, der die mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt. Die an den Kühlwasserkreislauf des Motors abgegebene Wärme wird dabei im Gebäude für Beheizung und Warmwasser genutzt. Für eine hohe Effizienz ist die Nutzung von möglichst viel Abwärme des BHKWs entscheidend. Der Kühlkreislauf bzw. in diesem Fall Heizungsrücklauf wird zuerst genutzt um den Generator zu kühlen. Im Anschluss wird über einen Abgaswärmeübertrager Abwärme des Motors aus dem Abgas entzogen und schließlich die eigentliche Abwärme des BHKWs abgeführt. Auf diese Weise werden Vorlauftemperaturen von über 80 °C möglich.

BHKWs dieser Art haben im Leistungsbereich von 0,3 - 25 kW_{el} typischerweise elektrische Wirkungsgrade von 25 - 30 % und thermische Wirkungsgrade von 55 - 75 % (vgl. [ASUE 2011]). Es ergeben sich Gesamtwirkungsgrade von 85 - 105 %, teilweise wurde in der Ermittlung dieser Wirkungsgrade die Brennwertnutzung berücksichtigt. Das Verhältnis von elektrischem und thermischem Wirkungsgrad wird als Stromkennzahl bezeichnet und im Kapitel 4.2.3 ausgeführt.

Für das Mehrfamilienhaus als PH+E ist jedoch nicht eine hohe Stromkennzahl der entscheidende Faktor zur Erreichung der Zielsetzung des Energiegewinns sondern der Gesamtwirkungsgrad des BHKWs. Durch eine hohe Stromkennzahl ist eine hohe Stromerzeugung und somit eine hohe Primärenergiegutschrift aufgrund der Einspeisung elektrischer Energie zu erhalten. In Hinsicht auf den verantwortungsvollen, möglichst geringen Einsatz von biogenen Brennstoffen ist eine hohe Stromkennzahl jedoch nicht unbedingt zielführend. Um das Biomassepotenzial von 35 kWh/(m²a) einhalten zu können, ist ein möglichst sparsamer Einsatz von Biomasse entscheidend. Hohe Stromkennzahlen in Verbindung mit hohen Primärenergiegutschriften und die Einhaltung des Biomassepotenziales sind daher zwei unterschiedliche Zielsetzungen, zwischen denen für das Mehrfamilienhaus als PH+E ein Mittelweg gefunden werden muss. Als zusätzliches Kriterium könnte die zeitliche Übereinstimmung der Höhe der Stromerzeugung im Verhältnis zum Strombedarf des Gebäudes berücksichtigt werden, da der Eigenverbrauch des erzeugten Stromes die Belastung des elektrischen Netzes deutlich reduziert. In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Einsatz eines BHKWs mit einem Gesamtwirkungsgrad von nahe 100 % (bezogen auf H_i) oder höher durch Brennwertnutzung, bei einer Stromkennzahl von 0,35 zielführend zur Erreichung des Energiegewinns ist (vgl. [Schaede, Großklos 2013]). Das Biomassepotenzial kann in diesem Fall eingehalten werden, wenn als zusätzlicher Wärmeerzeuger eine solarthermische Anlage eingesetzt wird, um den Bezug von Biomasse insgesamt zu reduzieren. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass im Gesamtkonzept des Mehrfamilienhauses als PH+E der durch das BHKW erzeugte Strom hauptsächlich zu den Zeiten anfällt, zu denen er aufgrund einer geringen Erzeugung durch die Photovoltaikanlage auch im Gebäude selbst genutzt werden kann. Eine detaillierte Betrachtung des Zusammenhangs von Stromkennzahl, Anteil an der gesamten Stromerzeugung des Gebäudes und Biomassepotenzial für verschiedene Arten der Kraft-Wärme-Kopplung wird in Kapitel 4.2.3 vorgenommen.

Um eine möglichst gleichmäßige Stromerzeugung durch das BHKW im Winter und lange Laufzeiten des Aggregats zu erhalten, ist es notwendig, große Pufferspeicher zu installieren. Diese dienen als Leistungsreserve, so dass die Leistung des BHKWs selbst verhältnismäßig klein ausgelegt werden kann.

Betriebsweise des BHKWs – wärmegeführt, stromgeführt, gemischt

Für das Mehrfamilienhaus als PH+E eignet sich am besten eine wärmegeführte Betriebsweise des BHKWs. Auf diese Weise wird nur bei Wärmebedarf Biomasse verbraucht und gleichzeitig als Nebenprodukt elektrische Energie erzeugt. Dies hat den Vorteil, dass die eingesetzte Biomasse mit höchster Effizienz genutzt werden kann. Bei einer stromgeführten Betriebsweise wird vorrangig zu Zeiten eines Strombedarfs erzeugt. Die Wärme fällt als Nebenprodukt an und wird in einem Pufferspeicher zwischengespeichert. Die stromgeführte Betriebsweise hat den Vorteil, dass der Anteil des selbst verbrauchten Stromes an der Eigenerzeugung erhöht und somit das elektrische Netz entlastet wird. Nachteil dieser Betriebsweise ist jedoch, dass das Nebenprodukt Wärme zwar gespeichert werden kann, bei einem geringeren Wärmebedarf als der Wärmeerzeugung jedoch aufgrund der Verluste des Pufferspeichers langfristig sich die Effizienz verringert. Wird in einem stromgeführten System als zusätzlicher Wärmeerzeuger eine solarthermische Anlage eingesetzt, besteht zusätzlich das Risiko, dass durch die Wärmeerzeugung des BHKWs die Effizienz der solarthermischen Anlage reduziert wird. Sind die Pufferspeicher bereits mit Abwärme aus dem BHKW gefüllt, könnte die solarthermische Anlage weniger Wärme einspeisen – im Endeffekt wäre in diesem Fall zu viel Biomasse verbraucht worden. Folge einer stromgeführten Betriebsweise wäre daher sehr wahrscheinlich ein zu hoher Einsatz an Biomasse. Gleichzeitig würde die Biomasse aufgrund der entstehenden höheren Speicherverluste als bei der wärmegeführten Betriebsweise weniger effizient genutzt. Daher eignet sich für das Mehrfamilienhaus als Passivhaus mit Energiegewinn aktuell die wärmegeführte Betriebsweise.

Optimal, um die beschriebenen Vorteile beider Betriebsweisen nutzen zu können, wäre eine gemischte Betriebsweise des BHKWs. Hier würde die für einen bestimmten Zeitraum (z. B. einen Tag) benötigte Wärmemenge bereits im Voraus bei aktuellem Strombedarf erzeugt. Diese Betriebsweise erscheint langfristig gesehen zielführend, wenn es gelingt, möglichst wenig überschüssige Wärme zu erzeugen und die Wärmeverluste der Pufferspeicher weiter zu reduzieren. Bei einer Anlagentechnik bzw. bei Pufferspeichern ohne Wärmeverluste wäre der Zeitpunkt der Wärmeerzeugung nicht mehr entscheidend für die Energieeffizienz des Systems. Dies ist jedoch in der Praxis nicht umsetzbar. Daher ist eine gemischte Betriebsweise des BHKWs auf eine optimale Regelung angewiesen, um möglichst keine überschüssige Wärme zu erzeugen. Wird zur Erzeugung des BHKWs als zusätzliche Wärmequelle eine solarthermische Anlage eingebunden, deren Wärmeerzeugung von der Sonneneinstrahlung abhängig ist, muss dies in der Regelung des BHKWs berücksichtigt werden. Die Schwierigkeit einer gemischten Betriebsführung liegt daher in der optimalen Regelung, die das BHKW nachrangig zu anderen Strom- und Wärmeerzeugern des PH+E abhängig vom Strombedarf regelt. Die Regelung müsste daher auf Basis guter Prognosen zum Wärmebedarf des Gebäudes für Heizung und Warmwasser und der solarthermischen Wärmeerzeugung realisiert werden. Solche Regelungen sind bisher am Markt wenig vertreten.

4.1.5 Weitere Typen von KWK-Anlagen für Passivhäuser mit Energiegewinn

Neben gasmotorischen Blockheizkraftwerken existieren noch einige andere Anlagentypen zur gemeinsamen Erzeugung von Wärme und Strom, die sich teilweise im elektrischen Wirkungsgrad deutlich von motorischen Mikro-BHKWs unterscheiden. Bild 34 zeigt die elektrische Leistung und die elektrischen Wirkungsgrade verschiedener KWK-Anlagen. Im Bereich kleiner elektrischer Leistungen bis 50 kW, die für kleine und mittlere Wohngebäude in Frage kommen, können neben den Gasmotoren auch Stirlingmotoren mit vergleichsweise niedrigem elektrischem Wirkungsgrad im Bereich von 10 % - 25 % und Brennstoffzellen mit Wirkungsgraden von 40 % im Niedertemperaturbereich und über 50 % im Hochtemperaturbereich eingesetzt werden. Letztere haben somit ein nennenswertes Potenzial, einen deutlich größeren Anteil an elektrischer Energie zu erzeugen und damit die Energiebilanz eines Gebäudes zu beeinflussen. Im Folgenden werden die im Bereich von kleineren Gebäuden einsetzbaren Techniken kurz dargestellt.

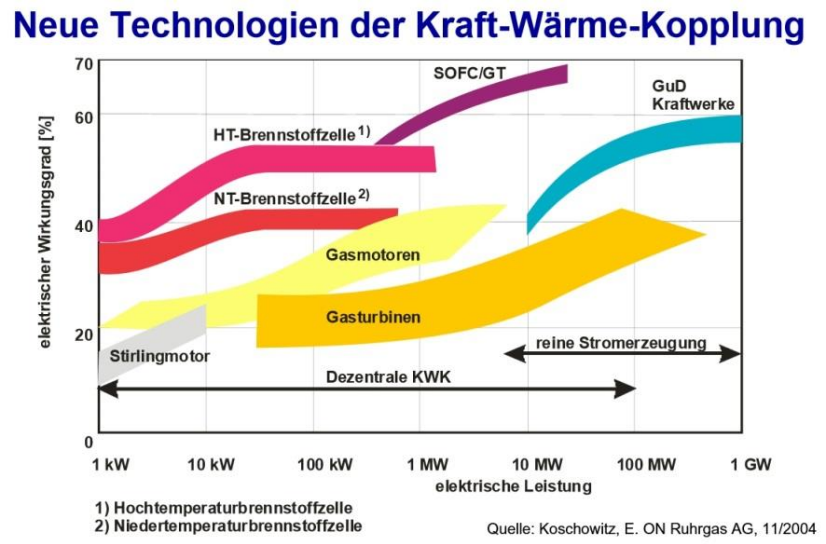


Bild 34: Vergleich verschiedener Technologien zur KWK, deren typischer Leistungsbereiche sowie ihr elektrischer Wirkungsgrad [Koschowitz 2004]

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind Energiewandler, die im Gegensatz zu motorischen Blockheizkraftwerken, Strom durch die chemische Umwandlung des Brennstoffs mit Luftsauerstoff erzeugen. Dadurch entfallen einerseits überwiegend die bewegten Teile eines Motors, so dass die Brennstoffzelle das Potenzial besitzt, leiser zu arbeiten als Motoren und geringerem mechanischem Verschleiß ausgesetzt ist. Andererseits liegen die theoretischen Wirkungsgrade der Stromerzeugung zum Teil deutlich höher als bei einem Verbrennungsmotor und die Brennstoffzelle hat theoretisch ein gutes Teillastverhalten, so dass bei Teillast der Wirkungsgrad höher liegt als bei Nennlast. Dies führt zu höheren Stromkennzahlen, d. h. die Brennstoffzelle produziert mehr elektrische Energie und weniger Abwärme (die Auswirkung werden in Kapitel 4.2.3 dargestellt). Außerdem liegen die Stickoxidemissionen (NOx) aufgrund der chemischen Umsetzung des Brennstoffs deutlich niedriger als bei Motor-BHKWs.

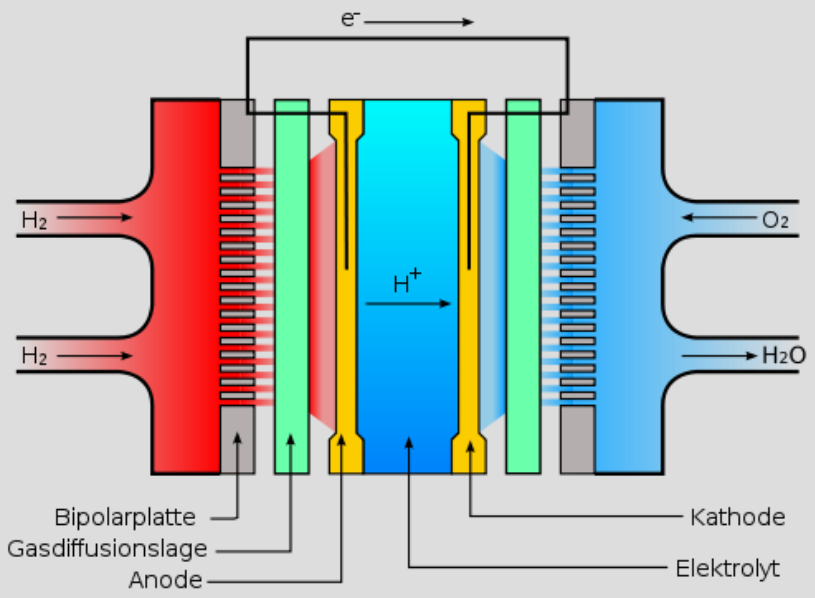


Bild 35: Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle [BZ_Wikipedia]

Die Funktionsweise einer Brennstoffzelle ist in Bild 35 dargestellt. Der Brennstoff Wasserstoff wird über eine bipolare Platte und einen Diffusor zur Anode geleitet, wo er mit Hilfe von Katalysatoren in Elektronen und H^+-Protonen aufgespalten wird. Die Elektronen werden auf der elektrisch leitenden Anode und der bipolaren Platte gesammelt und extern über den elektrischen Verbraucher zur Kathode geleitet. Die H+-Ionen wandern durch den Elektrolyten zur Kathode und vereinigen sich dort mit Sauerstoff aus der Luft sowie den zurückgeführten Elektronen zu Wassermolekülen, die als Wasserdampf abtransportiert werden. Diese einzelnen Zellen mit typischen Spannungen von ca. 0,7 V werden zu größeren Zellstapeln (Stacks) zusammengeschaltet, um höhere Ausgangsspannungen zu erreichen. Zusätzlich zum Stack sind noch eine Gasaufbereitung (Gasreinigung, Reformer), Brennstoff- und Verbrennungsluftzuführung (Kompressoren) und eine Regelung erforderlich, um ein funktionsfähiges Brennstoffzellengerät zu erhalten.

Es existieren unterschiedliche Arten von Brennstoffzellen, die sich durch ihre Betriebstemperatur, den Elektrolyt, der Anode und Kathode trennt und der Art und Reinheit des eingesetzten Energieträgers unterscheiden. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Typen, die für die Gebäudeversorgung zurzeit entwickelt werden. Niedertemperatur-Brennstoffzellen können nur reinen Wasserstoff als Brennstoff nutzen, der daher über einen vorgeschalteten Reformer aus Erdgas hergestellt wird. AFC, PEM und PAFC besitzen unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigung von Kohlenmonoxid und weiteren Gasen,

die AFC hat hier die höchsten Reinheitsanforderungen, die PAFC die geringsten. Hochtemperatur-Brennstoffzellen besitzen den Vorteil unempfindlich gegenüber Verunreinigungen zu sein und können direkt Methan verarbeiten. Mit steigender Arbeitstemperatur steigen jedoch auch die Materialbeanspruchungen beim Starten und Abschalten, so dass Hochtemperaturbrennstoffzellen überwiegend im Dauerbetrieb genutzt werden, um hier die Belastungen zu reduzieren. Die Dynamik der Niedertemperaturbrennstoffzellen wird jedoch durch den vorgeschalteten Reformer zur Gasaufbereitung ebenfalls eingeschränkt.

Tabelle 11: Übersicht der wichtigsten Brennstoffzellentypen und deren Kennwerte [Quelle: BZ_Wikipedia, eigene Recherchen]

	Brennstoff	Temperatur-bereich [°C]	Leistung [kW]	Elektrischer Wirkungsgrad [%]
Alkalische Brennstoff-zelle (AFC)	H_2	< 80 °C	bis 100 kW	45 % - 60 %
Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC)	H_2	ca. 80 °C (NT) ca. 160 °C (HT)	0,1 bis 500 kW	35 % - 60 %
Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	H_2	200 °C	< 10.000 kW	38 %
Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)	H_2, Methan, Kohlegas	650 °C	bis 100.000 kW	48 %
Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)	H_2, Methan, Kohlegas	600 °C - 1000 °C	bis 100.000 kW	30 % - 60 %

Für kleinere Wohngebäude werden zurzeit überwiegend PEMFC und SOFC entwickelt und zusammen mit einem Gaszusatzbrenner zur Spitzenlastabdeckung als kompaktes Heizaggregat kombiniert (Bild 36). Verschiedene Hersteller erproben ihre Geräte in einem großen Feldtest [Callux], um in naher Zukunft getestete Brennstoffzellenheizgeräte auf den Markt bringen zu können. Die elektrische Leistung dieser Brennstoffzellen liegt zwischen 300 W und 1,5 kW, die Stromkennzahlen liegen zwischen 0,5 und 2,5 und damit z. T. deutlich über den Kennzahlen, die mit gasmotorischen oder Stirling-BHKWs in dieser Leistungsklasse erreicht werden können. Ob die Angaben der Hersteller in der Praxis erreicht werden, muss sich noch zeigen. Auffällig sind die großen Unterschiede zwischen unterschiedlichen Mikro-Brennstoffzellen mit gleichem Funktionsprinzip (SOFC) (siehe Tabelle 12). Publizierte Ergebnisse von Teststandmessungen [Sommer, Mesenhöller 2013] deuten auf real erreichbare hohe elektrische Wirkungsgrade von 55 % - 60 % beim BlueGen hin, wobei die Langzeitstabilität verbessert werden muss und der Gesamtnutzungsgrad hier nur bei ca. 80 % lag. Nur wenn die höheren elektrischen Wirkungsgrade von über 50 % erreicht werden, ergeben sich auch nennenswerte wirtschaftliche und ökologische Vorteile (ohne Beachtung des Biomassebudgets) gegenüber motorischen BHKWs.

Tabelle 12: Exemplarischer Vergleich der Kenndaten unterschiedlicher SOFC-Brennstoffzellenheizgeräte

Anbieter	Elektrische Leistung	Elektrischer Wirkungsgrad	Stromkenn-zahl	Quelle
Vaillant BZ- Mikro-KWK	1 kW	30 % - 34 %	0,5	[Vaillant]
Hexis Galileo 1000 N	1 kW max.	25 % - 30 %	0,5	[Galileo]
Ceramic Fuel Cells BlueGen MG 2.0	0,5 - 2 kW 1,5 kW typisch	bis zu 60 %	ca. 2,5	[BlueGen]

Wichtiger Punkt bei der Planung von Brennstoffzellen ist eine möglichst konstante Betriebstemperatur, da Brennstoffzellen wenig Temperaturwechsel vertragen. So gibt [BlueGen] an, dass die Anlaufzeit dieser SOFC 25 h beträgt, [Baxi] gibt für seine Niedertemperatur PEMFC immer noch 20 h an. In [Sommer, Mesenhöller 2013] wurde eine nennenswerte Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades bei häufigen Lastwechseln festgestellt. Somit muss genau geprüft werden, wie die erzeugte Wärme zwischengespeichert werden kann, um auch die erforderliche Energieeffizienz der Wärmenutzung zu erreichen.

Bild 36: Ansichten von zwei Brennstoffzellen-Heizgeräten, links eine SOFC, Mitte eine Niedertemperatur-PEMFC, recht Blick auf den Zellstapel einer PEMFC

Die Brennstoffzelle ist ein reiner Energiewandler. Ob sie als Energieerzeuger in einem Passivhaus mit Energiegewinn geeignet ist, entscheidet sich durch den eingesetzten Brennstoff. Durch die Verwendung von Biomethan kann sie regenerative Energieträger in Strom und Wärme umwandeln. Es existieren auch Modellversuche zum Einsatz von Bio- oder Grubengas direkt in einer Hochtemperaturbrennstoffzelle (MCFC), die Leistung dieser Gerät ist jedoch für den Einsatz in Wohngebäuden zu hoch, so dass für Passivhäuser mit Energiegewinn vor allem der bilanzielle Bezug von Biomethan über das Erdgasnetz eine realistische Option einer regenerativen Energieversorgung darstellt.

Stirlingmotoren

Stirlingmotoren sind Kolbenmaschinen mit externer Verbrennung, d. h. die Wärme wird nicht in der Kolbenmaschine erzeugt, sondern dieser durch einen Wärmetauscher zugeführt (Heißgasmaschine). Dadurch ist eine kontinuierliche Verbrennung möglich, was die Laufruhe erhöht und die Schadstoffemissionen vermindert. Außerdem können mit ihm flexibel unterschiedliche Brennstoffe oder Energiequellen genutzt werden.

Für den Gebäudebereich wurden in den letzten Jahren kompakte Stirling-Mikro-BHKWs von unterschiedlichen Herstellern entwickelt, die jedoch überwiegend auf das gleiche Stirlingaggregat zurückgreifen. Neben gasbetriebenen Stirling-Heizgeräten wurden auch Holzpellet-beheizte Geräte erprobt. Diese können somit direkt einen regenerativen Energieträger für die Stromerzeugung nutzen. Ebenfalls zu den Motoren mit externer Wärmezufuhr gehören die Freikolbenmotoren, für die es jedoch zurzeit kaum Anbieter gibt. Die Entwicklung an einem Freikolben-Pelletgerät wurden mittlerweile eingestellt [Lion 2014]. Nachteil aller Stirlingmotoren ist bisher der niedrige elektrische Wirkungsgrad, so dass nur wenig Strom bei der Beheizung erzeugt wird (Tabelle 13).

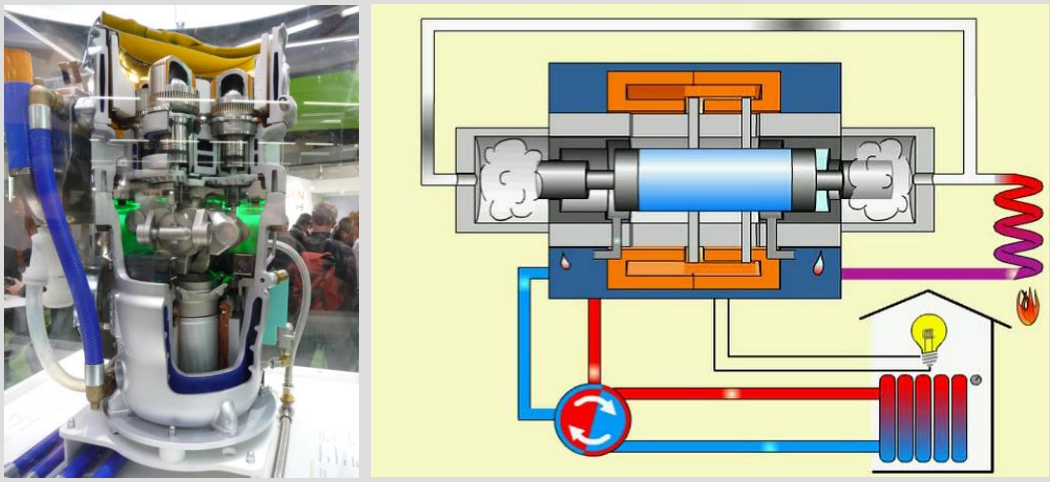


Bild 37: links: Stirlingmotor im Schnitt, rechts: Funktionszeichnung eines Linearkolbenmotors [Lion energy 2014]

Tabelle 13: Exemplarisch Kennwerte einiger Stirling-Miko-BHKWs (Quelle: Herstellerangaben)

	Brennstoff	Thermische Leistung [kW]	Elektrische Leistung [kW]	Elektrischer Wirkungsgrad [%]
Senertec Dachs Stirling SE	Erdgas	3,0 -6,1	1	16 %
WhisperGen EU1-DE	Erdgas	7	1	14 %
Brödje EcoGen WGS 20.1	Erdgas	5	0,3 - 1,0	20 %
Viessmann Vitowin 300-W	Erdgas	6	1	17 %
ÖkoFen PELLEMATIC SMART_e	Holzpellets	14	1	7 %
Lion Energy Lion Powerblock (Linearstirling)	Holzpellets	3,0 - 16,0	0,3 - 2,0	9 %

4.1.6 Biomassekessel und -öfen

Biomasse kann nicht nur in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen genutzt werden, sondern grundsätzlich auch in Öfen oder Kessel ausschließlich zur Wärmeerzeugung. Hier besteht eine deutlich größere Auswahl an Energieträgern zur Verfügung. Neben Biogas oder Pflanzenölen können auch Scheitholz, Holzhackschnitzel oder Holzpellets genutzt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass der Schadstoffausstoß direkt nach der Zündung deutlich höher ausfällt als im kontinuierlichen Betrieb. Auch ist bei minimaler Leistung der Verbrennungsvorgang nicht optimal. Aus diesem Grund werden Biomassekessel, teilweise auch Primäröfen, mit einem zusätzlichen Pufferspeicher betrieben, um einen möglichst gleichmäßigen Betrieb und wenige Anfahrvorgänge zu erreichen. Die minimalen verfügbaren Leistungen bei Pelletkesseln liegen bei ca. 3 kW, bei Pelletöfen bei ca. 2 kW.

Grundsätzlich sind Passivhäuser mit Energiegewinn auch realisierbar, wenn Biomassekessel eingesetzt werden. Hier sind jedoch einige Randbedingungen zu Berücksichtigen.

Bild 38: Beispiel einer Pelletheizung mit Brennwertnutzung [Paradigma 2014]

Für Mehrfamilienhäuser mit ihren höheren Heizlasten steht eine große Palette an Kesseln zur Beheizung zur Verfügung. Allerdings ist bei Mehrfamilienhäusern durch den höheren absoluten Stromverbrauch zur Erreichung eines Energieüberschusses meist eine gemeinsame Erzeugung von Wärme und Strom erforderlich. Für die Stromerzeugung fällt dann ebenfalls ein Biomasseverbrauch an, so dass das Biomassepotenzial schnell überschritten wird und die Anforderungen an das PH+E nicht mehr erfüllt werden können. Außerdem sollten biogene Energieträger mit höchster Effizienz genutzt werden, so dass z. B. die Nutzung von Biomethan oder Rapsöl in einem Brennwertkessel nicht den Nachhaltigkeitsanforderungen entspricht.

Bei Einfamilien- oder kleinen Mehrfamilienhäusern könnte auch unter Einhaltung des Biomassebudgets Biomasse zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Es stellt sich jedoch die Schwierigkeit, dass die minimalen Heizleistung der Öfen und Kessel zwar für die Auslegungsheizlast niedrig genug sind, während des überwiegenden Teils der Heizperiode aber deutlich zu hoch ausfällt. Dies kann zu Überhitzungsproblemen führen, besonders bei Öfen, die direkt im Wohnraum aufgestellt werden. Der damit verbundene höhere Heizenergieverbrauch ist nicht im Sinne eines PH+E.

Somit scheidet bei den meisten Passivhäusern mit Energiegewinn die Verbrennung von Biomasse ausschließlich zur Wärmeerzeugung aus. Nur bei kleinen Gebäuden ist ein Einsatz denkbar, wenn genügend elektrische Energie mit Photovoltaik erzeugt werden kann.

4.1.7 Vorschlag zur Zertifizierung des Biomethanbezugs eines Gebäudes

Bisher stellt sich das Problem, dass der Bezug von Biomethan für ein Gebäude eine rein bilanzielle Betrachtung darstellt, da vor Ort das Gebäude an das lokale Erdgasnetz angeschlossen ist und räumlich getrennt der Lieferant sicherstellt, dass die abgenommene Gasmenge in der Jahresbilanz auch als Biomethan eingespeist wird. Dass trotz einer räumlichen Trennung von Erzeugung und Verbrauch auch nennenswerte Beiträge regenerativer Energien erreicht werden können, zeigt der Anteil Erneuerbarer im deutschen Strommix.

Es stellt sich jedoch das Problem, dass ein solcher Liefervertrag für Biomethan schnell und ohne Änderung an der Anlage auf Erdgas umgestellt werden kann und der ökologische Vorteil, der sich durch den Biomethanbezug ergeben sollte, nicht langfristig garantiert ist. Aus diesem Grund lässt der Gesetzgeber auch bei der Festlegung der Primärenergiefaktoren im Rahmen der Energieeinsparverordnung niedrige Primärenergiefaktoren von 0,5 kWh_{PE}/kWh_{End} für Biomethan nur bei räumlichem Zusammenhang zwischen Biogasanlage und Gebäude zu (z. B. auf dem Hof, auf dem sich die Biogasanlage befindet). Gebäude, die über das Erdgasnetz bilanziell mit Biomethan beliefert werden, müssen den Primärenergiefaktor von Erdgas (1,1 kWh_{PE}/kWh_{End}) verwenden. Diese Einschränkung für Biomethan ist sachlich nachvollziehbar, da keine baulichen Vorkehrungen für dauerhaften Bezug von Biomethan geschaffen werden. Dennoch stellt sich die Frage, wie Biomethan, wenn es in Kraft-Wärme-Kopplung[8] [9] bei hocheffizienten Passivhäusern eingesetzt wird, adäquat zu seiner Umweltwirkung bilanziert und berücksichtigt werden kann.

Da es bei Wohngebäuden, anders als bei Stromerzeugungsanlagen nach EEG /EEWärmeG keine Kontrolle oder Nachweisführung zur Überprüfung eines fortwährenden, unterbrechungsfreien Bezugs des entsprechenden regenerativen Energieträgers gibt[10], müssen andere Wege beschritten werden, um den Biomethaneinsatz dauerhaft nachweisen zu können. Ein möglicher Ansatz zur Lösung dieses Dilemmas könnte über ein öffentlich zugängliches Register erfolgen, bei dem die bezogenen Biomethanmengen gesammelt und publiziert werden und über das Internet einsehbar sind.

Vorbild könnte das Biogasregister sein, das ab 2009 von verschiedenen Biogaserzeugern und -händlern sowie der Deutschen Energieagentur (dena) entwickelt wurde, um die Biogasqualität und die eingespeiste und abgenommene Biogasmenge im Gasnetz bilanzieren und kontrollieren zu können. Dies war durch die Novellierung des EEG 2009 erforderlich geworden, die eine Vor-Ort-Verstromung des Biogases ermöglichte. Voraussetzung für eine EEG-Vergütung ist ein „… genügender Nachweis der Herkunft (u. a. eingesetzte Rohstoffe und technische Standards bei der Biogasproduktion und Aufbereitung) des eingesetzten Biomethans.“[Biogasregister 2014]. Beim Biogasregister bucht der Biomethanerzeuger eingespeistes Gas in das Register ein, und ein Umweltgutachter überprüft die Anlagen und die Produktion vor Ort und bestätigt Mengen, Eigenschaften und Herkunft des Biogases. Das Biogas wird über Händler an Endkunden weiterverkauft, die es aus dem Netz entnehmen. Der Lieferant bucht die entsprechende Menge aus dem Biogasregister aus und erhält einen Registerauszug, der Menge, Herkunft und Eigenschaftsprofil des Biomethans dokumentiert. Mit diesem Registerauszug kann der Endkunde seinen Biogasbezug für die EEG-Vergütung nachweisen. Das Biogasregister ist keine offizielle staatliche Institution, wird aber von mehreren Stellen (Clearingstelle EEG, BDEW) als Nachweisstelle anerkannt.

---

8 Untersuchungen in [IFEU 2008] zeigen, dass eine Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und Einspeisung ins Erdgasnetz nur dann ökologisch sinnvoll und vorteilhaft ist, wenn eine 100%-ige KWK-Nutzung stattfindet.

9 siehe auch Untersuchung des IFEU zum Einsatz von Biomethan in KWK [IFEU 2013]

10 Die Rechnungen über den Bezug von Biomethan müssen nach EEG/EEWärmeG fünf Jahre aufbewahrt werden und bei einer möglichen Prüfung ggf. vorgelegt werden. Wenn zeitweise kein Biomethan bezogen wurde, so erlischt der Anspruch auf eine EEG-Vergütung

Überträgt man nun dieses System auf die Wärmeversorgung von Gebäuden mit KWK, so könnte zur Dokumentation der bezogenen Biogasmengen der jährliche Registerauszug herangezogen werden. Es stellt sich hier aber das Problem, dass es keine Kontrollinstanz gibt und der Gebäudeeigentümer im Gegensatz zur EEG-Vergütung oder dem EEG-Bonus keinen zusätzlichen Anreiz besitzt, langfristig das Haus mit Biomethan zu versorgen, wenn dies nicht ausschließlich aus der ökologischen Motivation heraus geschieht. Wird unterstellt, dass Biomethan, besonders wenn es aus Rest- oder Abfallstoffen hergestellt wurde, eine ökologisch sinnvolle Energieversorgung für Gebäude[11] darstellt, sollte die Möglichkeit der Biomethannutzung mit KWK-Anlagen ausgeweitet werden. Dazu könnte in einem ersten Schritt für die Vorreiter der Nutzung („early adopters“) ein erweitertes Register eingerichtet werden, bei dem jederzeit einsehbar ist, wieviel Biomethan in welchem Jahr für ein Gebäude bezogen wurde. Im zweiten Schritt könnte eine Anerkennung des Nachweises in der EnEV stehen, wenn das Biomethan hocheffizient in KWK genutzt wird. Hier wären jedoch Sanktionsmöglichkeiten zu diskutieren, wenn der Biomethanbezug nachträglich gestoppt wird, das Gebäude aber beim Bauantrag aufgrund des Biomethanbezugs den Primärenergiebonus erhalten hat. In diesem Fall müsste ohnehin unter den neuen Randbedingungen des Gebäudes ein Energieausweis erstellt werden und ggf. weitere Maßnahmen zur Einhaltung der Randbedingungen der EnEV oder einer erhaltenen KfW-Förderung umgesetzt werden. Durch die Erweiterung des Biogasregisters auf Gebäude würde daher zusätzlich z. B. die langfristige Kontrolle der Einhaltung von KfW-Förderbedingungen bei Biomethannutzung deutlich vereinfacht.

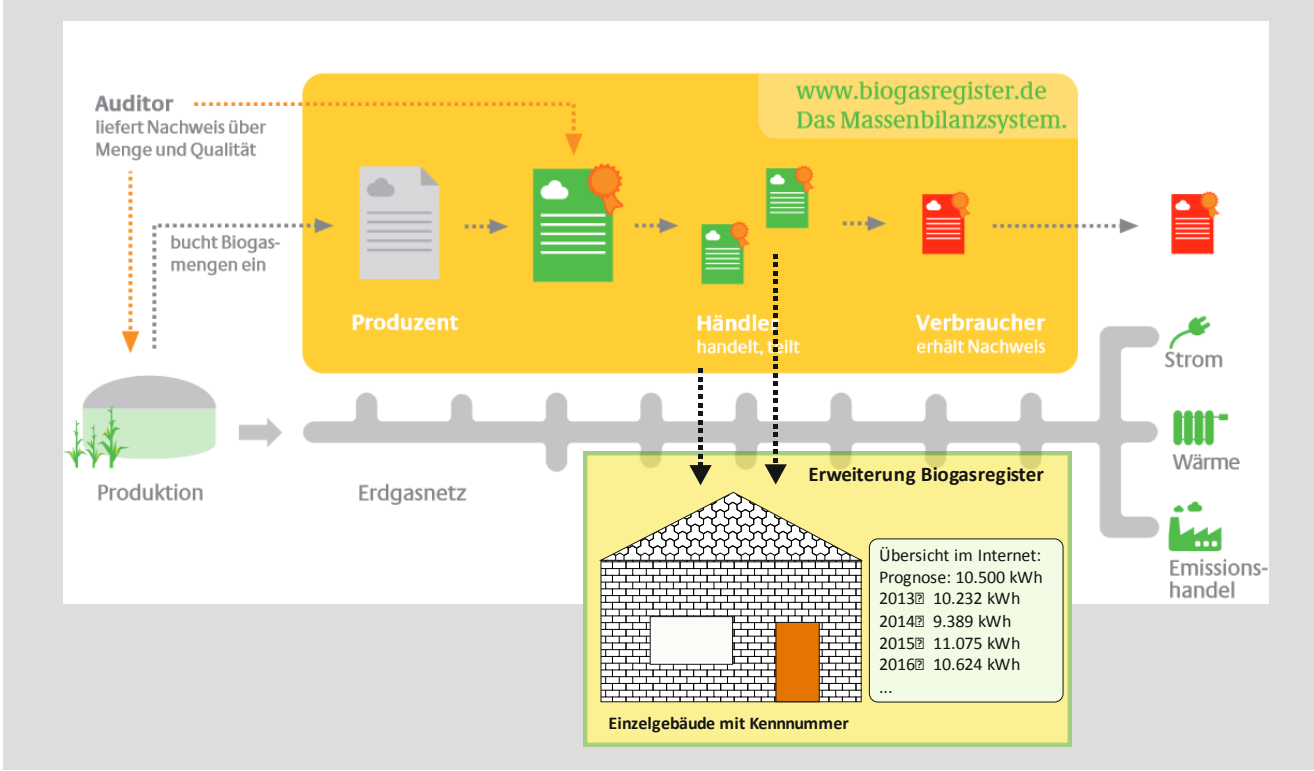


Bild 39: Mögliche Ergänzung des Biogasregisters zur transparenten Bilanzierung des Biogasbezugs bei einem einzelnen Gebäude (Bildquelle: [Biogasregister 2014] ergänzt um eigene Vorschläge)

[11] Die Potenziale zur nachhaltigen Biogaserzeugung in Deutschland sind zu klein, um eine Vollversorgung aller Gebäude zu erreichen, selbst wenn alle den Passivhausstandard aufweisen. Somit stellt Biomethan nur einen Baustein einer zukünftigen, nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland dar.

Das vorgeschlagene Register lehnt sich an das existierende Biogasregister an und wäre als Erweiterung dessen sinnvoll und denkbar (Bild 39). Dabei wird für ein Gebäude, das langfristig mit Biomethan versorgt werden soll, im erweiterten Biogasregister ein Datensatz angelegt, in dem die Adresse des Gebäudes und die prognostizierte Abnahmemenge (aus Planungen Fachingenieur oder Bauantrag) hinterlegt werden. Der Lieferant verbucht die bezogen jährlichen Gasmengen und die Biomethanqualität (z. B. aus Reststoffen, mit NaWaRos) dann für dieses Gebäude. Wird nur ein Biogas-Erdgas-Gemisch bezogen, so darf nur der entsprechende Biomethananteil bei der Verbuchung berücksichtigt werden. Die Mengen sind dann nachvollziehbar dokumentiert und öffentlich einsehbar, vergleichbar der exakten Identifikation des Produzenten bei bestimmten (Bio-)Lebensmitteln. Denkbar wäre eine Plakette am Gebäude, die die Teilnahme an diesem Register dokumentiert und eine Gebäudekennnummer besitzt, über die der Datensatz im erweiterten Biogasregister aufgerufen werden kann. Die zusätzlichen Kosten eines solchen erweiterten Registers wären gering. Neben einer Erweiterung der Software des Registers müsste bei Aufnahme eines Gebäudes einmalig ein Datensatz für dieses aufgenommen werden. Die Verbuchung beim Lieferanten kann dann wieder softwaregestützt automatisch ablaufen.

Besonders bei Gebäuden mit bilanziellem Energieüberschuss könnte dieses System die Transparenz beim Biomethaneinsatz deutlich verbessern. Durch die Verbuchung auf ein Gebäude ist dem Hauseigentümer auch ein Wechsel zu anderen Anbietern möglich, so dass hier eine gewisse Marktoffenheit gegeben ist. Gegenwärtig ist der Anreiz zur effizienten Nutzung von Biomethan in Gebäuden noch gering, da aufgrund des nach EnEV anzusetzenden hohen Primärenergiefaktors von 1,1 kWh_{PE}/kWh_{End} der Planer keine Vorteile durch die Biomethannutzung erzielt. Stattdessen wird das Biomethan teilweise mit geringem Wirkungsgrad im Verkehrsbereich eingesetzt.

4.1.8 Gegenüberstellung der Techniken der Wärmeerzeugung

In Tabelle 14 werden die dargestellten regenerativen Wärmeerzeuger noch einmal zusammenfassend verglichen.

Tabelle 14: Gegenüberstellung verschiedener regenerativer Wärmeerzeuger

	Wärmepumpe	Solarthermie	BHKW und weitere Typen von KWK
Vorteile	- Einsatz von ausschließlich elektrischer Energie für Wärme und Strom	- fast kein Primärenergieeinsatz zur Wärmeerzeugung benötigt	- effizientester Einsatz des Energieträgers Biomasse - in Kombination mit einer solarthermischen Anlage wird Wärme und Strom nur zu Zeiten ungenügender solarerEinstrahlung produziert
Nachteile	- Hoher Bezug von elektrischer Energie aus dem Netz im Winter - Effizienz der Wärmepumpe ist stark abhängig von möglichst geringen Systemtemperaturen		- Nutzung eines (regenerativen) Brennstoffs - Betriebsführung des BHKWs muss auf eine möglichst sparsame Nutzung dieses Brennstoffs ausgelegt sein, dies steht teilweise in Konkurrenz zur Wirtschaftlichkeit
Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes	Hoch, sehr stark abhängig von der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe	Mittel, es wird weniger Wärme durch andere regenerative Energieerzeuger benötigt, es kann jedoch auch weniger Photovoltaik zur el. Energieerzeugung und Kompensation installiert werden	Mittel, hoher Einfluss auf das genutzte Biomassepotenzial, daher ist eine Kombination mit einem zusätzlichen, solaren Wärmeerzeuger zielführend
Nutzungskonkurrenz	Abhängig von der Einbindung zusätzlicher regenerativer Energieerzeuger müssen die Komponenten sehr gut aufeinander angestimmt sein, es darf zwischen Wärmepumpe und z. B. Solarthermie keine Nutzungskonkurrenz um ein möglichst geringes Temperaturniveau geben	Ggf. Flächenkonkurrenz zu Photovoltaik, Abstimmung des Verhältnisses zwischen Solarthermie und Photovoltaik unter Berücksichtigung der Energiebilanz und bei zusätzlichem Einsatz eines BHKWs auch unter Berücksichtigung des Biomassepotenzials benötigt.	Keine

4.2 Stromerzeugung

Die Stromerzeugung des Passivhauses mit Energiegewinn wird auf der einen Seite zur Deckung des Strombedarfs benötigt. Auf der anderen Seite führt die darüber hinausgehende Stromerzeugung durch Einspeisung dieser Energie in das elektrische Netz und entsprechende Gutschrift schließlich in der Jahresbilanz zum Energiegewinn. Zur Stromerzeugung eines PH+E kommen verschiedene Anlagentechniken in Betracht. Mögliche Anlagentechniken auf Basis regenerativer Energieträger sind Photovoltaik, bei Einsatz von regenerativen Energieträgern auch Kraft-Wärme-Kopplung, der bei der Wärmeerzeugung gleichzeitig produzierte Strom (vgl. Kapitel 4.1.4) sowie Klein-Windkraftanlagen.

4.2.1 Photovoltaik

Photovoltaik ist für das Passivhaus mit Energiegewinn der wichtigste Baustein der elektrischen Energieerzeugung. Ziel ist es, den Photovoltaikertrag des Gebäudes zu maximieren. Daher müssen alle verfügbaren Flächen, die sinnvoll nutzbar sind, bestmöglich zur Energie-Produktion genutzt werden. Wesentliche Einflussgrößen auf den Photovoltaikertrag sind der Standort, der Wirkungsgrad der verwendeten Photovoltaik-Module und die bestmögliche Ausnutzung der verfügbaren (Dach-)Flächen. In Tabelle 15 sind die wichtigsten Einflussgrößen auf den Photovoltaikertrag dargestellt.

Tabelle 15: Einflussgrößen auf den Photovoltaikertrag des PH+E

<table>
<tr><th>Standortabhängige Einflussgrößen</th><th>Standortunabhängige Einflussgrößen</th></tr>
<tr><td>Einstrahlung am Standort des Gebäudes</td><td>Wirkungsgrad der Photovoltaikmodule</td></tr>
<tr><td>Gebäudeausrichtung</td><td rowspan="3">Bestmögliche Ausnutzung der vorhandenen Flächen durch optimale Belegung, Ausrichtung und Neigung der Photovoltaik-Module</td></tr>
<tr><td>Dachausrichtung (falls kein Flachdach)</td></tr>
<tr><td>Verschattung der verfügbaren Flächen</td></tr>
<tr><td colspan="2">Verfügbarkeit geeigneter Fassadenflächen für die Photovoltaik-Erzeugung</td></tr>
</table>

Wesentlichen Einfluss können Planer von Passivhäusern mit Energiegewinn auf den Photovoltaikertrag nehmen. Eine Standort-unabhängige Einflussgröße, die im Folgenden kurz erläutert wird.

Wirkungsgrad der Photovoltaikmodule

Die technisch möglichen Wirkungsgrade von PV-Modulen haben sich in den letzten Jahren rasant erhöht – mittlerweile sind Photovoltaik-Module mit Wirkungsgraden von bis zu 20 % am Markt verfügbar. Diese werden mit unterschiedlichen Technologien erreicht. Zum einen gibt es Photovoltaikmodule, deren Wirkungsgrad durch hocheffiziente Zellen in Kombination mit der Verwendung von Rückseitenkontakten gesteigert wird (vgl. [Sunpower 2013]). Die Rückseitenkontakte haben an dieser Stelle den Einfluss, dass mehr Fläche der Zelle zur Produktion elektrischer Energie zur Verfügung steht. Bei anderen Photovoltaikmodulen wird der Wirkungsgrad erhöht, indem mehrschichtige Photovoltaikzellen verwendet werden. Diese bestehen aus monokristallinen Wafern, die mit dünnem amorphem Silizium beschichtet werden, so genannten HIT-Zellen (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) (vgl. [Panasonic 2013]). Solche hocheffizienten Module erhöhen aufgrund ihres Wirkungsgrades von ca. 20 % den Energieertrag pro installiertem Modul im Vergleich zu herkömmlichen Modulen mit ca. 15 % Wirkungsgrad um ein Drittel. Stehen im Falle von Mehrfamilienhäusern im Verhältnis zur Wohnfläche nur geringe Flächen für die solare Energieerzeugung zur Verfügung, ist der Einsatz hocheffizienter Module in den meisten Fällen notwendig, um einen Energiegewinn des Gebäudes erreichen zu können. Aktuell sind hocheffiziente Photovoltaikmodule noch deutlich teurer

als herkömmliche, auch bei Betrachtung der Kosten in Bezug auf die installierte Leistung in €/kWp. Vor diesem Hintergrund der Notwendigkeit teurere, hocheffiziente Module zu verwenden, um den Energiegewinn erreichen zu können, zeigt sich wiederum die Bedeutung der Reduktion des elektrischen Energiebedarfs des Gebäudes vor Deckung dieses Bedarfs mit regenerativen Energien.

Bestmögliche Ausnutzung der vorhandenen Flächen durch optimale Belegung, Ausrichtung und Neigung der Photovoltaik-Module

Mit dem Ziel, einen möglichst hohen Energieertrag pro installierter Modulfläche bzw. pro kWp installierter Leistung zu erreichen, werden Photovoltaikanlagen nach Süden ausgerichtet installiert. Bei Südausrichtung und einer Neigung von 28° wird der maximale Ertrag pro kWp installierter Leistung erzielt (vgl. Bild 40).

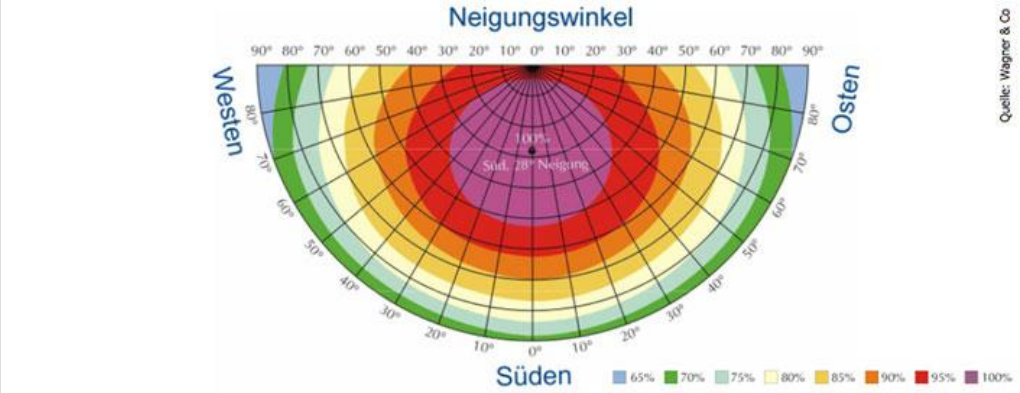


Bild 40: Ertrag in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung

Quelle: Wagner & Co

Eine vorhandene Dachneigung nach Süden ist daher optimal für hohe Photovoltaikerträge. Für Flachdächer gibt es entsprechende Aufständerungen, um nach Süden ausgerichtet, die für den optimalen Energieertrag benötigte Neigung der Module zu erreichen (vgl. Bild 41 links). Um bei einer Aufständerung einen möglichst hohen Ertrag aus den Modulen zu erhalten, muss der Abstand zwischen ihnen mit steigender Neigung anwachsen, um die gegenseitige Verschattung zu reduzieren. Der Zusammenhang zwischen Abstand und Verschattung ist in Bild 41 rechts dargestellt.

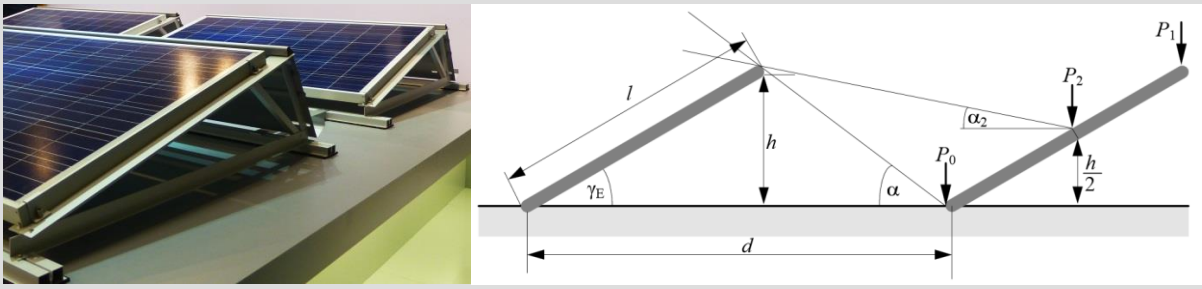


Bild 41: Aufständerung für süd-ausgerichtete Module (links), Zusammenhang zwischen Abstand und Verschattung (rechts)

Quelle: oben: IWU; unten: [Quaschning 1998]

In [Quaschning 1998] werden die relativen Abschattungsverluste abhängig vom Abschattungswinkel dargestellt (vgl. Bild 42). Aus der Darstellung wird deutlich, dass bei Süd-Ausrichtung der Module und optimaler Neigung von ca. 28° ein kleiner Abschattungswinkel und damit beträchtlicher Abstand zwischen den Modulen erforderlich ist, wenn nur geringe Verluste akzeptiert werden sollen. Werden die Module in dieser Weise auf einem Dach aufgestellt, wird daher eine große Dachfläche benötigt.

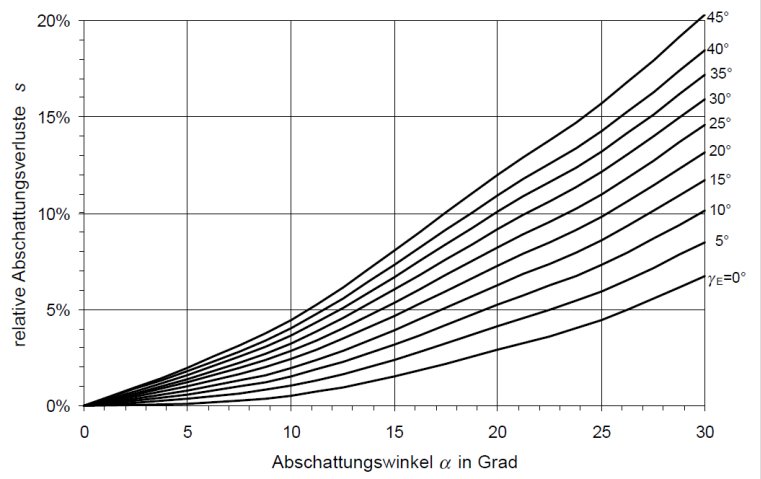


Bild 42: Relative Abschattungsverluste abhängig vom Abschattungswinkel

Quelle: [Quaschning 1998]

Das Ziel, einen möglichst hohen Energieertrag pro installierter Modulfläche zu erreichen, führt daher nicht gleichzeitig auch zu dem Ziel, einen möglichst hohen Energieertrag pro zur Verfügung stehender Dachfläche zu erreichen. Eine Möglichkeit die Dachfläche besser auszunutzen, ist es, die Photovoltaikmodule mit einer geringen Neigung nach Osten und Westen ausgerichtet aufzustellen (vgl. Bild 43 links). In diesem Fall wird aufgrund der etwas ungünstigeren Ausrichtung ein leicht geringerer Ertrag pro Photovoltaik-Modul hingenommen (vgl. Bild 43 rechts), gleichzeitig können jedoch deutlich mehr Module auf dem Dach installiert werden und der gesamte Energieertrag des Daches steigt.

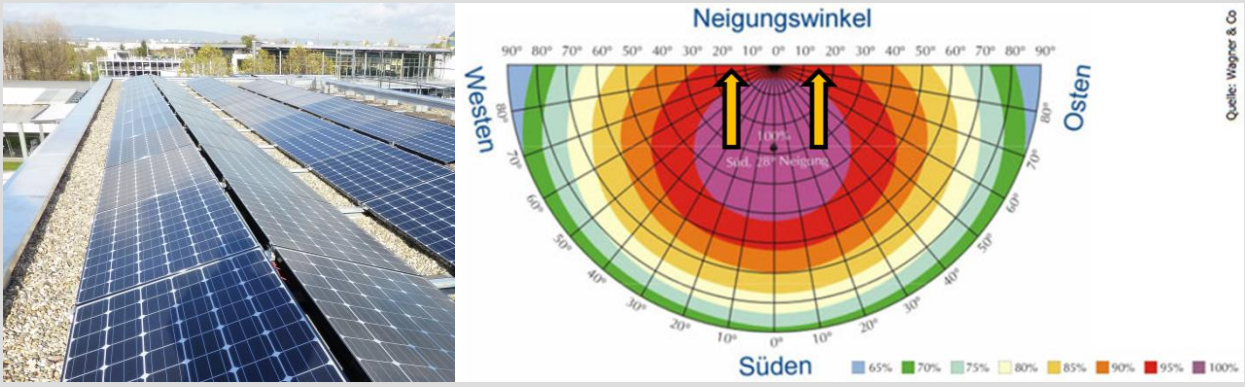


Bild 43: Links: Beispiel einer Ost-West aufgeständerte Photovoltaikanlage, rechts: Ertrag bei Ost-West-Ausrichtung

Quelle: links: IWU, rechts: Wagner & Co (mit Erweiterung)

Aufgrund der abwechselnden Aufstellung in Ost-/West-Neigung wird automatisch ein Verschattungswinkel in Höhe der Neigung berücksichtigt, so dass zumindest bei geringer Modulneigung nur geringere Verluste durch die gegenseitige Abschattung entstehen. Hier dargestellt ist die Aufständerung der Photovoltaikanlage in Ost-/West-Ausrichtung mit einer Neigung von 15°. Eine geringere Neigung würde theoretisch zu leicht höheren Erträgen führen. In der Praxis ist jedoch eine Neigung von mindestens 10°, besser 15° zu empfehlen, da mit steigender Neigung der Selbstreinigungseffekt der Module zunimmt, die Anlage daher nicht so schnell verschmutzt. Dies ist notwendig, da sich die Erträge aus der Anlage mit zunehmender Verschmutzung stark verringern können.

Der erzielbare Energieertrag eines mit Photovoltaik belegten Daches wird in den Beispielrechnungen in Kapitel 5.2.2 detailliert betrachtet. Dabei werden verschiedene Ausrichtungen und Neigungen der Module betrachtet, abhängig von der Dachform und der Ausrichtung des Daches.

Verfügbarkeit geeigneter Fassadenflächen für die Photovoltaik-Erzeugung

Systeme zur Energieerzeugung durch Photovoltaik an Fassaden sind zurzeit im Verhältnis zu dem daraus resultierenden Energieertrag noch verhältnismäßig teuer. Eine optimale Ausnutzung der zuvor beschriebenen zur Verfügung stehenden Dachflächen ist daher umso wichtiger und gleichzeitig auch kostengünstiger. Die Nutzung der Fassaden-Flächen wird jedoch für die Erreichung des Energiegewinns bei großen Mehrfamilienhäusern benötigt, da die zur solaren Energieerzeugung zur Verfügung stehende Dachfläche pro m² Wohnfläche mit zunehmender Gebäudegröße geringer wird. Aus diesem Grund kommt der Fassaden-Photovoltaik mit steigender Gebäudegröße eine größer werdende Bedeutung zu.

Im Vergleich zu Photovoltaikanlagen auf dem Dach erzeugen Anlagen an der Fassade aufgrund ihrer Neigung von 90° weniger Energie pro kWp installierter Leistung. Ihr Ertrag ist gegenüber einer nach Süden ausgerichteten Anlage mit optimaler Neigung um ca. 25-30 % reduziert (vgl. Bild 40). Hinzu kommt, dass Fassadenflächen in der Regel durch Nachbarbebauung und Bäume in städtischen Gebieten stärker verschattet werden als Dachflächen. Daher ist es besonders wichtig, Fassaden-Photovoltaik frühzeitig in die Planung des Gebäudes einzubeziehen, geeignete Fassadenflächen zu identifizieren und in der weiteren Planung zu berücksichtigen. Für gewöhnlich steht die Fassaden-Photovoltaik, die am besten nach Süden ausgerichtet installiert wird, dabei in Konkurrenz zu großen Fensterflächen auf dieser Gebäudeseite. Die Fensterflächen werden zur Tageslichtnutzung im Gebäude und für die Erzielung solarer Wärmegewinne des Passivhauses im Winter benötigt. Diese Fensterflächen zu reduzieren, um mehr Fassaden-Photovoltaik installieren zu können, wäre jedoch kontraproduktiv, da eine Verringerung der Fensterflächen einen verstärkten Energieverbrauch für Wärme und Beleuchtung und eine verminderte Wohnqualität zur Folge hätte. Bei frühzeitigem Einbezug der Fassaden-Photovoltaik in die Planung kann hier jedoch auf ein optimales Zusammenspiel und ein optisch ansprechendes Erscheinungsbild geachtet werden.

4.2.2 Klein-Windkraft

Klein-Windkraftanlagen können zur Energieerzeugung eines Gebäudes beitragen. Ihr Ertrag ist jedoch von vielen Faktoren abhängig, so dass eine verlässliche Ertragsprognose schwierig ist. Große Erträge im Verhältnis zur verfügbaren Fläche sind in vielen Fällen, insbesondere in Städten, kaum möglich. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Windenergieertrag von Klein-Windkraftanlagen in Städten werden an dieser Stelle dargestellt, im Anschluss werden die Einsatzmöglichkeiten für das PH+E diskutiert.

Windenergieerzeugung in Städten

Grundlage der Windenergieerzeugung sind die Windgeschwindigkeit am Standort, die Häufigkeit, mit der hohe Windgeschwindigkeiten erreicht werden, die Turbulenz des Windes und die spezifischen Eigenschaften von Windkraftanlagen unter diesen Randbedingungen (Umwandlung in elektrische Energie). Die Windgeschwindigkeit ist zusätzlich zum jeweiligen Standort von der Höhe und der Rauhigkeit des Gebietes abhängig (vgl. Bild 44).

Den größten Einfluss auf die Energieerzeugung der Windkraftanlage hat die im Wind enthaltene kinetische Leistung. Diese ist in dritter Potenz direkt von der Windgeschwindigkeit abhängig:

$$P_{kin} = \frac{1}{2}\rho * A * v^3$$

mit: ρ = Luftdichte, A = Rotorfläche, v = Windgeschwindigkeit

Praktisch bedeutet dies, dass bei einer Verdoppelung der Windgeschwindigkeit die 8-fache Leistung im Wind enthaltenen ist. Die Windgeschwindigkeit am speziellen Standort ist daher der entscheidende Faktor für den Energieertrag aus einer Windkraftanlage. Wie aus Bild 44 ersichtlich wird, sind in Städten aufgrund der dichten Bebauung geringere Windgeschwindigkeiten zu erwarten als auf einer freien Fläche auf dem Land. Zusätzlich ist der Wind in der Stadt turbulenter. Die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu und die Turbulenz nimmt ab. Eine Prognose der Windgeschwindigkeit in der Stadt ist daher sehr schwierig und eine langfristige Windmessung am Standort unumgänglich, um eine Ertragsprognose erstellen zu können.

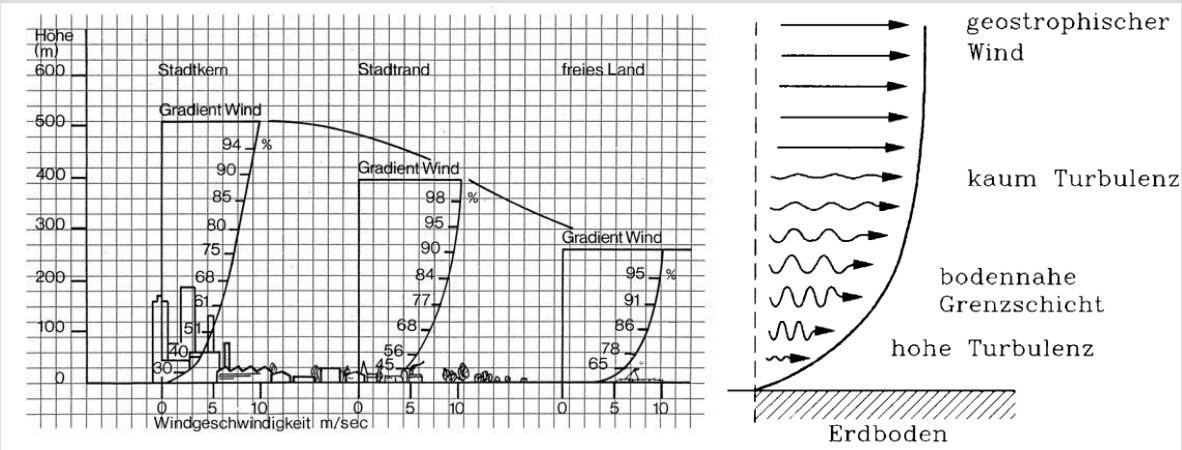


Bild 44: Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Gebietes und Turbulenz des Windes

Quelle: www.stadtklima-stuttgart.de (links); www.elite.tugraz.at (rechts)

Von der im Wind enthaltenen Leistung sind – abhängig von der Windkraftanlage – theoretisch bis zu 60 % nutzbar. In der Realität können bei großen Windkraftanlagen maximal 48 % genutzt werden (vgl. [Lange 2008]). Die Leistungskennlinie einer Windkraftanlage beschreibt, wieviel Energie die Anlage abhängig von der Windgeschwindigkeit erzeugt. Bild 45 zeigt exemplarisch die Leistungskennlinie einer Klein-Windkraftanlage und einer großen Windkraftanlage. Wesentliche Unterschiede zwischen den dargestellten Anlagen sind die Leistung und die Anlaufgeschwindigkeit der Windkraftanlage. Aufgrund der beschriebenen Faktoren ist in Städten mit geringeren Windgeschwindigkeiten zu rechnen als auf der freien Fläche. Damit auch diese geringen Windgeschwindigkeiten genutzt werden können, ist eine geringe Anlaufgeschwindigkeit der Windkraftanlage wichtig.

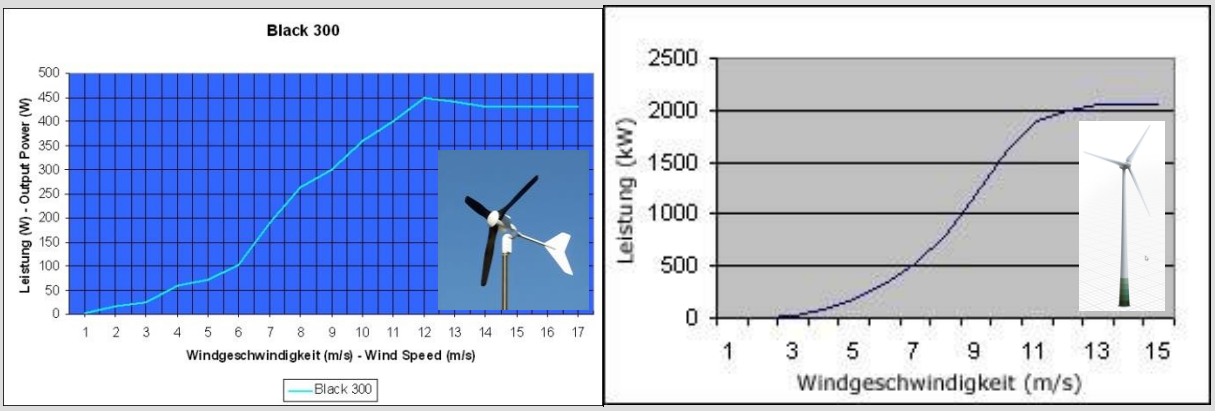


Bild 45: Leistungskurven von Windkraftanlagen; links: Klein-Windkraftanlage „Black 300"; rechts: Enercon E82

Quelle: www.shop.fahrwind.de; www. rothaarwind.de; www.enercon.de

Der Energieertrag aus der Windkraftanlage über ein Jahr gesehen, ergibt sich schließlich auf Basis der Häufigkeit, mit der verschiedene Windgeschwindigkeiten, bzw. Leistungen der Windkraftanlage erzielt werden.

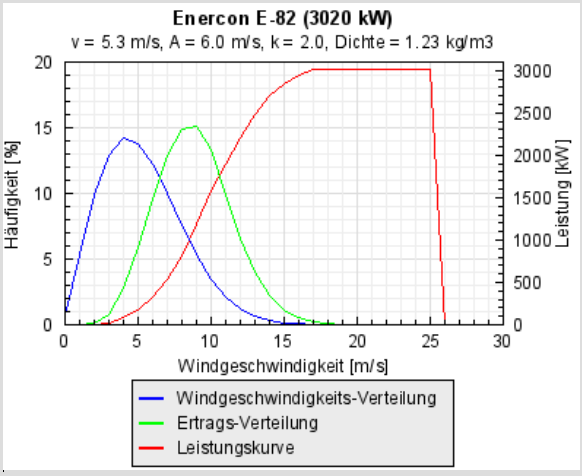


Bild 46: Leistungskurve, Windgeschwindigkeits-Verteilung und Ertragsverteilung

Quelle: Ertragsrechner auf www.wind-data.ch

Bild 46 zeigt exemplarisch die Windgeschwindigkeitsverteilung in Nabenhöhe (blau) am Standort einer großen Windkraftanlage. In Kombination mit der Leistungskurve (rot) ergibt sich daraus die Ertrags-Verteilung (grün). Für eine kleine Windkraftanlage in einer Stadt verschiebt sich diese Kurve der Windgeschwindigkeits-Verteilung aufgrund der geringeren Windgeschwindigkeiten nach links und auch die Ertrags-Verteilung verschiebt sich zu geringeren Windgeschwindigkeiten, in der Folge sinkt der Energieertrag. Insgesamt sind daher bei der Nutzung von Klein-Windkraftanlagen in Städten deutlich geringere Energieerträge im Verhältnis zur Größe der Windkraftanlage erzielbar als bei großen Anlagen auf freier Fläche. Ursache ist hauptsächlich die Häufigkeit von nur geringen Windgeschwindigkeiten in Städten.

Randbedingungen für die Nutzung von Klein-Windkraftanlagen

Bei der Nutzung von Klein-Windkraftanlagen in städtischen Gebieten ist zusätzlich die Berücksichtigung der Hauptwindrichtung in Zusammenhang mit der Gebäudeausrichtung wichtig, um die ertragreichsten Installationsorte an/auf einem Gebäude identifizieren zu können. Bild 47 stellt diese Zusammenhänge dar.

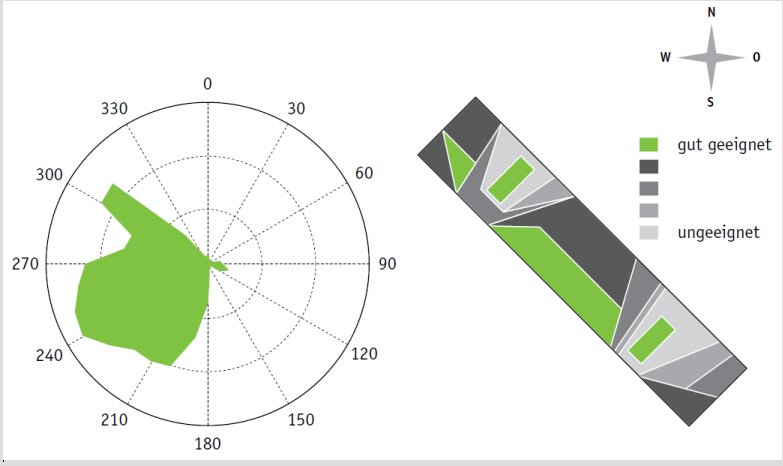


Bild 47: Anlagenposition – Draufsicht des Standortes mit möglichen Eignungsflächen und Richtungsverteilung der Energie (qualitative Darstellung)

Quelle: [Twele 2013]

In ihrem Leitfaden mit dem Titel „Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum“ hat die Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin [Twele 2013] weitere wesentliche Randbedingungen und Handlungsempfehlungen für die Nutzung von Klein-Windkraftanlagen zusammengestellt. Neben der optimalen Auswahl des Standortes und der größtmöglichen Höhe ist die Wahl der Windkraftanlage passend zum Standort wichtig. Bild 48 stellt die verschiedenen Arten von Windkraftanlagen sowie ausgeführte Beispiele dar.

Die unterschiedlichen Typen von Windkraftanlagen, insbesondere die Unterscheidung zwischen Horizontalachsanlagen (links im Bild) und Vertikalachsanlagen (rechts), hat große Auswirkungen auf die Effizienz und den Betrieb der Anlagen. So sind Horizontalachsanlagen generell effizienter, haben aber höhere Schallemissionen als Vertikalachsanlagen. Vertikalachsanlagen sind im Gegenzug toleranter bei nicht optimaler Anströmung, also schräger Anströmung oder bei Turbulenzen. Wesentliche Unterschiede ergeben sich auch bei Gewicht und Kosten der Anlagen, diese sind bei Vertikalachsanlagen für gewöhnlich höher als bei Horizontalachsanlagen.

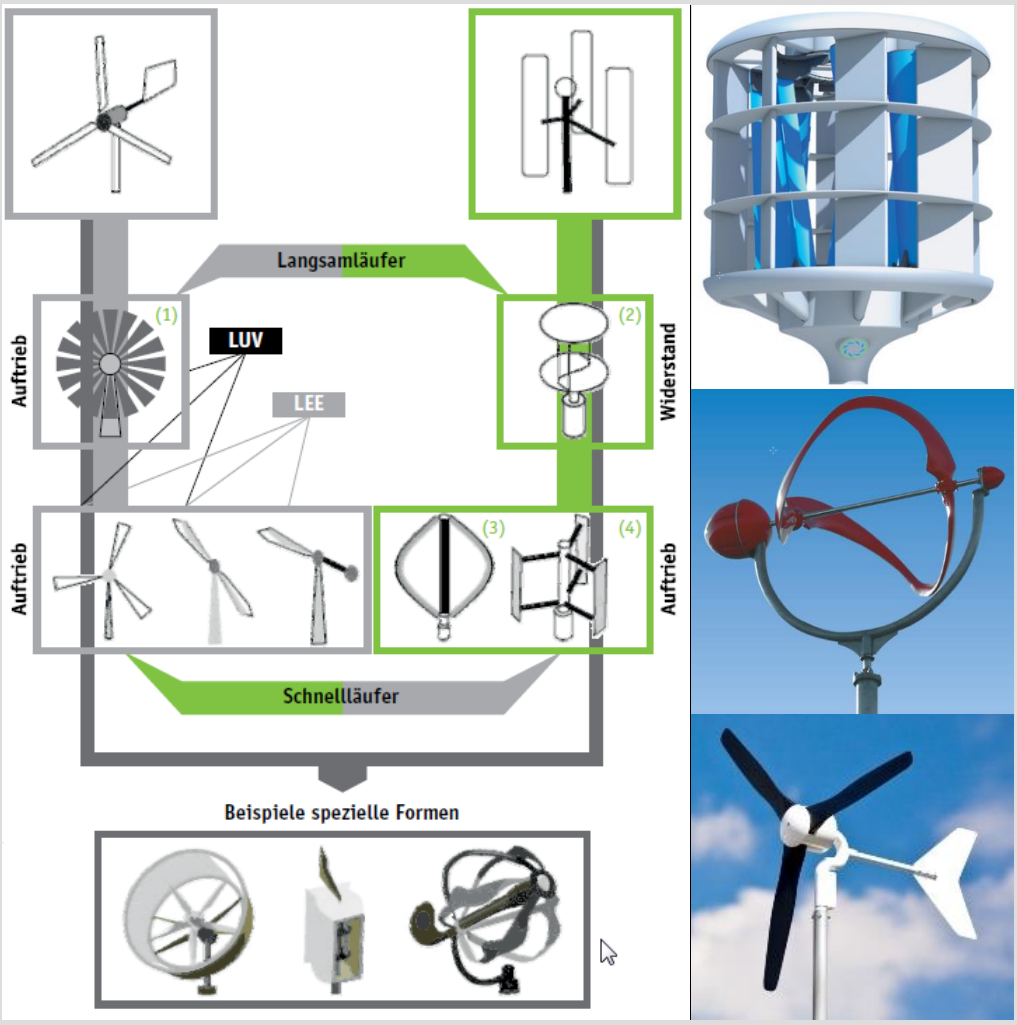


Bild 48: Arten von Klein-Windkraftanlagen und Beispiele

Quelle: [Texheimer 2009]; www. Turbina.de, www.wittenbauer-windkraft.de ,www.rs-energietechnik.de

Einsatzmöglichkeiten von Klein-Windkraftanlagen für das Mehrfamilienhaus als PH+E

Die dargestellten Randbedingungen zeigen die Schwierigkeiten der Nutzung von Klein-Windkraftanlagen in städtischen Gebieten auf. Schlecht planbare, an den meisten Standorten eher geringe Erträge mit dem Risiko nennenswerter Geräuschentwicklungen bei vergleichsweise hohen Kosten zur Minimierung dieses Risikos zeigen auf, dass hier zur erfolgreichen Umsetzung dieser Anlagen eine sehr umfassende Planung notwendig ist. Eine längerfristig angelegte Windmessung an einem oder mehreren Punkten zur Ertragsprognose und Standortwahl sind zwingend notwendig um eine Klein-Windkraftanlage erfolgreich in städtischen Gebieten umsetzen zu können. Eine Weiterentwicklung der Technologie hin zu geringeren Geräuschemissionen und Praxiserfahrungen des Einsatzes in Städten könnten die Umsetzung dieser Anlagen in Zukunft erleichtern. Die Autoren sehen Klein-Windkraftanlagen daher als eine mögliche Variante den Energiegewinn des PH+E weiter zu erhöhen, wenn eine Lärmbelästigung der Anwohner ausgeschlossen werden kann. Weiterhin lassen sich Windkraftanlagen in den meisten Fällen sehr gut zu Photovoltaikanlagen am Gebäude ergänzen, da abhängig von Art und Installationsort der Klein-Windkraftanlage nur wenig oder keine Dachfläche für Photovoltaik verloren geht. Das Potenzial zur Energieerzeugung am Gebäude durch Klein-

Windkraftanlagen wird jedoch deutlich geringer eingeschätzt als das der Photovoltaik. Eine Kombination beider Anlagentechniken ist jedoch gut möglich und könnte wie in Bild 49 dargestellt aussehen.

Bild 49: Beispiel zur Installation von Kleinwindkraft am Gebäude (Plusenergie-Bürogebäude in Mainz)

Quelle: www.detail.de

Tabelle 16 fasst die Einflussgrößen auf den Energieertrag von Klein-Windkraftanlagen in Städten zusammen.

Tabelle 16: Einflussgrößen auf den Energieertrag von Klein-Windkraftanlagen in Städten

Standortabhängige Einflussgrößen	Standortunabhängige Einflussgrößen
Windgeschwindigkeiten am Standort des Gebäudes und in der nutzbaren Höhe	Leistungskurve und Anlaufgeschwindigkeit der Klein-Windkraftanlage (sollte bei ihrer Auswahl abhängig von den zu erwartenden Windgeschwindigkeiten berücksichtigt werden)
Einfluss der umliegenden Bebauung und Bepflanzung	Art der Windkraftanlage
Hauptwindrichtung und Anlagenposition auf dem Gebäude	Eignung der Windkraftanlage für turbulente Strömungen in der Stadt

4.2.3 Auswirkungen unterschiedlicher Stromkennzahlen der KWK auf die Energiebilanz eines Passivhauses mit Energiegewinn

In Kapitel 4.1.4 und 4.1.5 wurden verschiedene KWK-Anlagen zur Wärme- und Stromerzeugung vorgestellt. Sie werden aus diesem Grund im Kapitel zur Stromerzeugung nicht weiter ausgeführt. Etwas detaillierter soll aber auf den Einfluss der Stromkennzahl eingegangen werden.

Wird ein BHKW wärmegeführt betrieben, d. h. immer dann, wenn im Gebäude ein Wärmebedarf besteht, dann unterscheidet sich die wärmeseitige Dimensionierung zwischen Gasottomotor-, Brennstoffzellen- und Stirling-BHKW nicht grundsätzlich. Allerdings muss je nach Regelverhalten ggf. ein größerer Pufferspeicher zur Überbrückung von Lastspitzen vorgesehen werden. Werden die durch den Pufferspeicher bedingten Wärmeverluste minimiert, so unterscheiden sich die verschiedenen BHKW-Konzepte im Wesentlichen in dem Anteil der zeitgleich erzeugten elektrischen Energie (Stromkennzahl) und dem resultierenden Brennstoffverbrauch.

Um die Auswirkungen von unterschiedlichen Stromkennzahlen prinzipiell zu verdeutlichen, sind in am Beispiel des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4 in Frankfurt die Wärmeerzeugung, die elektrische Energieerzeugung sowie der Brennstoffverbrauch bei Gesamtnutzungsgraden von 90 % für Brennstoffzellen, 96 % für Stirlingmotoren und 93 % für Gasottomotor-BHKWs dargestellt (jeweils ohne Brennwertnutzung). Außerdem wird der Anteil dargestellt, den das BHKW am Gesamtstromverbrauch des Gebäudes beisteuert.

Die Wärmeerzeugung ist bei allen Varianten aufgrund der wärmegeführten Betriebsweise bei vollständiger Deckung durch das BHKW gleich. Die Stromerzeugung hängt dann linear mit der Wärmeerzeugung über die Stromkennzahl zusammen und erreicht bei einer Stromkennzahl von 1 deren Höhe. Der Brennstoffverbrauch steigt mit zunehmender Stromerzeugung ebenfalls an. Unter Berücksichtigung des maximalen Biomassebudgets [Diefenbach 2002] von 35 kWh/(m²a) ergibt sich aus dieser Berechnung, dass bei Brennstoffzellen die Stromkennzahl bei vollständiger Deckung des Wärmebedarfs nicht über 0,42 ansteigen darf, bei Motor-BHKW und Stirling liegen diese Werte aufgrund des etwas höheren Gesamtnutzungsgrades zwischen 0,46 und 0,49. Das BHKW würde bei dieser Stromkennzahl in Summe etwa 45 %-52 % des Stromverbrauchs des Gebäudes erzeugen. Um eine vollständige Deckung des Stromverbrauchs durch das BHKW zu erreichen, wäre in diesem Beispiel eine Stromkennzahl von 0,95 erforderlich. Dieser Wert kann nur von Brennstoffzellen oder großen Motor-BHKWs erzielt werden. Nicht berücksichtigt sind bei dieser Betrachtung erforderliche Gutschriften für das eingesetzte Biomethan, die dann ggf. über PV-Anlagen erbracht werden müssen. Auch die Leistungen der am Markt oder in Marktvorbereitung befindlichen BHKWs wurden nicht berücksichtigt, sondern es wurde eine für den Anwendungsfall genau passende Anlagengröße unterstellt. Außerdem wurde für die Anlagenregelung (Lastmanagement, An- und Abfahren) eine monotechnologische Versorgung (kein Spitzenlastkessel) unterstellt.

Aus den Betrachtungen zeigt sich, dass unter Berücksichtigung des Biomassebudgets verfügbare motorische Mikro-BHKWs durchaus gut geeignet sind für den Einsatz in Passivhäusern mit Energiegewinn. Die Stromkennzahlen von mindestens 0,5 bei Brennstoffzellen führen bei vollständiger Wärmeversorgung durch die Brennstoffzelle schon zu einer Überschreitung des Biomassebudgets, was sich bei sehr hohen Stromkennzahlen jenseits von 1 noch deutlich verstärkt. Bei Stirling-BHKW werden Stromkennzahlen von 0,1 bis 0,2 erreicht. Diese Anlagen führen nicht zu einem Überschreiten des Biomassebudgets, sie decken jedoch auch nur max. 20 % des Stromverbrauchs.

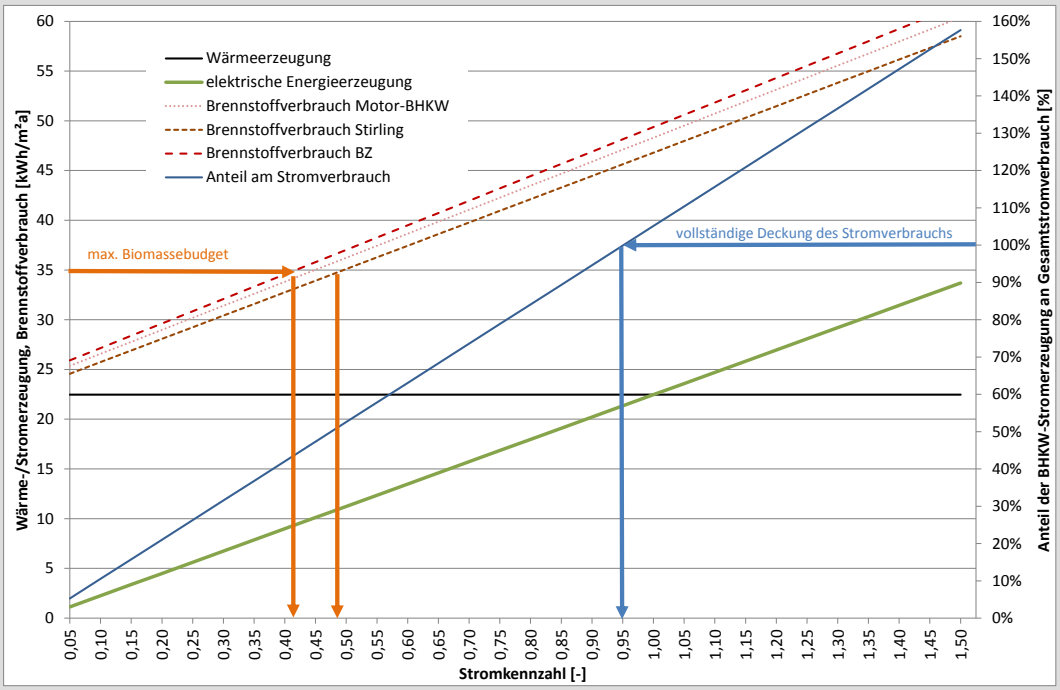


Bild 50: **Auswirkungen unterschiedlicher Stromkennzahlen auf die Stromerzeugung durch das wärmegeführte BHKW bei einem Gebäude mit thermischer Solaranlage**

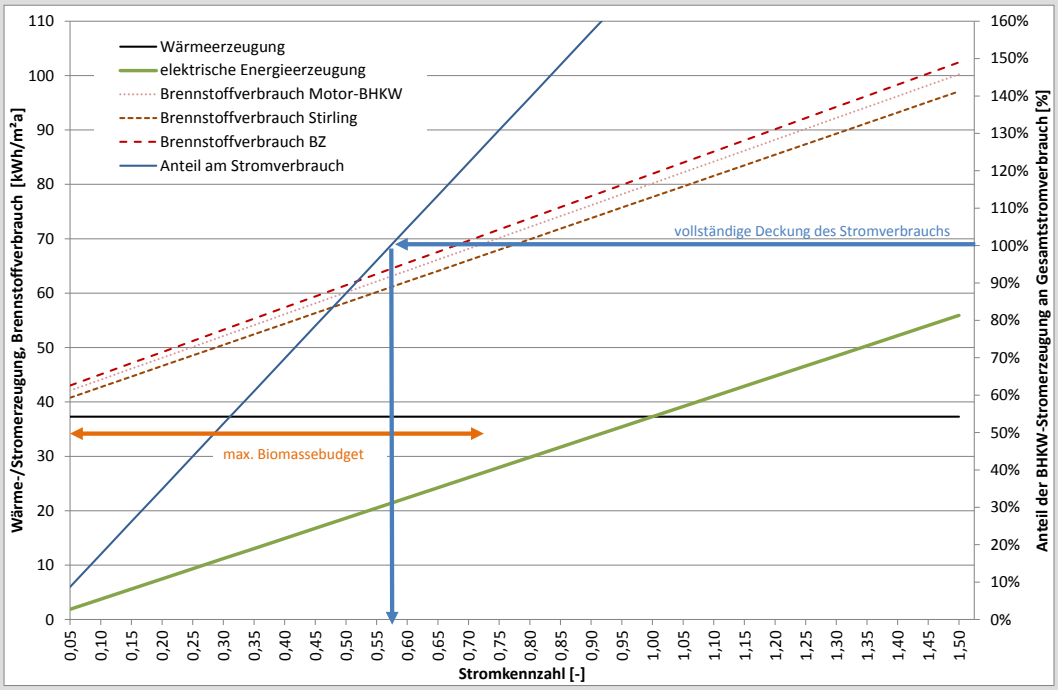


Bild 51: **Auswirkungen unterschiedlicher Stromkennzahlen auf die Stromerzeugung durch das BHKW ohne thermische Solaranlage im Gebäude**

Wird am Gebäude die thermische Solaranlage eingespart, da üblicherweise die Solaranlagen als Konkurrenz für eine möglichst lange Betriebszeit des BHKW angesehen werdend, so erhöht sich der Gesamtwärmebedarf und es ergibt sich das Diagramm in Bild 51. Eine vollständige Deckung des Stromverbrauchs wird bei einer Stromkennzahl von 0,57 erreicht. Das Biomassebudget wird aber bereits vom Wärmebedarf überschritten, so dass keine Variante den Anforderungen entspricht.

4.2.4 Auswirkungen verschiedener elektrischer Energieerzeuger auf das Netz

Die verschiedenen vorgestellten Arten der regenerativen elektrischen Energieerzeugung haben unterschiedliche Auswirkungen auf das elektrische Netz. Während Photovoltaik- und Windstrom nur zur Verfügung stehen, wenn gerade die Sonne scheint bzw. der Wind weht, erfolgt die elektrische Energieerzeugung einer KWK-Anlage bei der beschriebenen wärmegeführten Betriebsweise abhängig von dem aktuellen Wärmebedarf eines Gebäudes. Im Folgenden wird der zeitliche Verlauf der elektrischen Energieerzeugung der einzelnen Anlagen exemplarisch dargestellt und ihre Auswirkungen auf das elektrische Netz diskutiert.

Photovoltaik

In Bild 52 ist exemplarisch die Photovoltaikerzeugung eines PH+E dargestellt. Die Erzeugung ist typischerweise im Sommer am höchsten und im Winter deutlich niedriger (siehe auch Bild 12 in Kapitel 3.1). In der Jahresbilanz erreicht das PH+E anhand der Photovoltaik-Erzeugung einen Energiegewinn jedoch nur aufgrund großer Energieüberschüsse im Sommer. Bei einer monatlichen, wöchentlichen oder täglichen Bilanzierung ist ein Energieüberschuss nicht immer möglich. Insbesondere im Winter wird häufig Energie aus dem elektrischen Netz bezogen. Das elektrische Netz wird daher als „saisonaler Speicher“[12] genutzt um in der Jahresbilanz den Energiegewinn erreichen zu können.

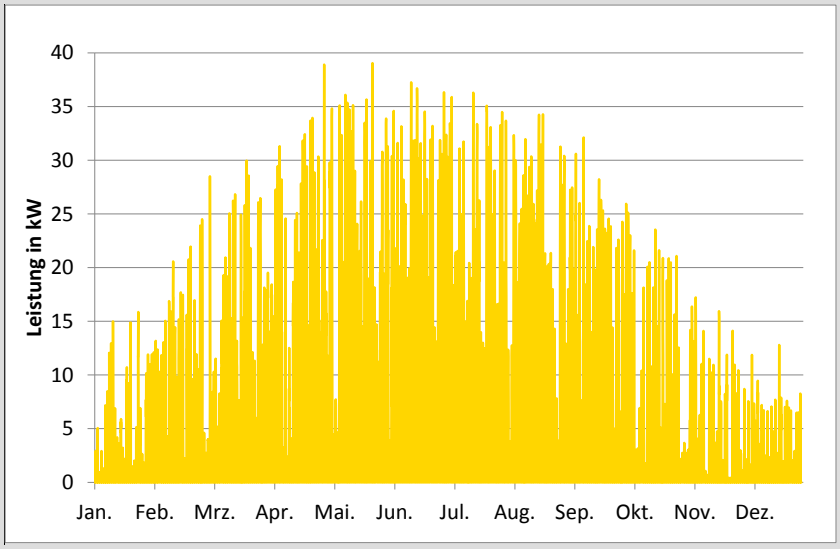


Bild 52: Simulationsergebnisse der elektrischen Energieerzeugung einer Photovoltaikanlage eines PH+E für ein Jahr (hier am Beispiel des PH+E Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main)

[12] Der Begriff „saisonaler Speicher“ ist insofern irreführend, als die elektrische Energie im Netz nicht gespeichert wird, sondern zum Zeitpunkt der Erzeugung verbraucht wird. Für die spätere, bilanzielle Entnahme muss die Energie neu erzeugt werden. Bei der aktuellen Zusammensetzung des Strommixes in Deutschland ergibt sich im Jahresverlauf ein vergleichsweise gleichmäßiger Anteil regenerativer Energie im Strommix [Großklos, Frank 2013]. Die im Winter entnommene Energie wird jedoch nur zu ca. 25 % aus regenerativen Energien erzeugt, 75 % stammen weiterhin aus konventionellen Kraftwerken.

Betrachtet man den typischen Tagesgang der Photovoltaik-Erzeugung (vgl. Bild 53), kann für das einzelne Gebäude lediglich die tagsüber benötigte elektrische Energie durch Photovoltaik zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der hohen Erzeugung wird jedoch auch zu dieser Zeit viel Energie in das elektrische Netz eingespeist. Diese Einspeisung erfolgt zu Zeiten, in denen für gewöhnlich eine hohe Lastabnahme aus dem elektrischen Netz vorliegt. Photovoltaikstrom ist daher wertvoller „Spitzenlaststrom". Durch den starken Zuwachs an installierten Photovoltaikanlagen wird jedoch mittlerweile zu dieser Tageszeit an manchen Tagen mehr Strom produziert, als abgenommen werden kann. Es wird daher erforderlich diesen Strom verstärkt im Gebäude selbst zu nutzen, um das elektrische Netz zu entlasten. Durch den Einsatz elektrischer Energiespeicher kann tagsüber erzeugter Photovoltaikstrom zur Nutzung zu anderen Tageszeiten zwischengespeichert werden. Ausführliche Untersuchungen zur Auswirkung elektrischer Energiespeicher und des zeitlichen Ausgleichs von Bedarf und Erzeugung am Beispiel des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main sind in [Schaede, Großklos 2013] dargestellt.

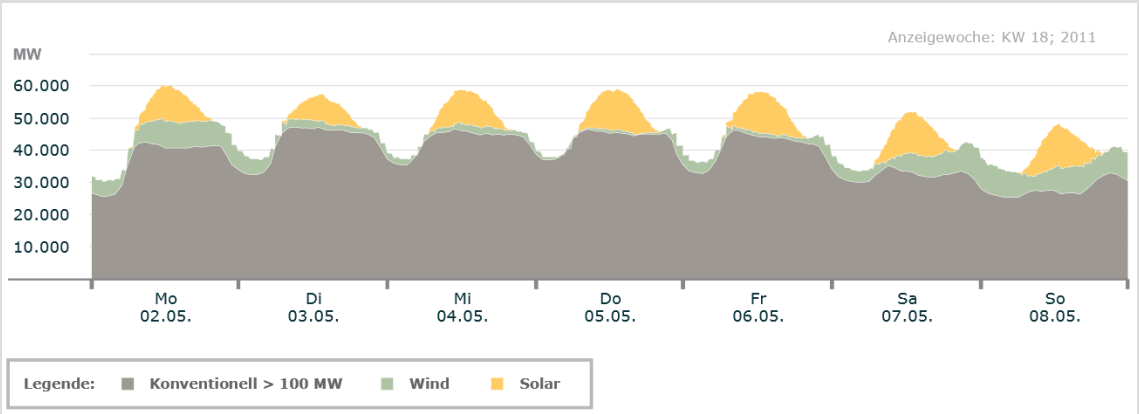


Bild 53: Beispielhafte Photovoltaik- und Windenergieerzeugung sowie konventionelle Erzeugung im Verlauf über mehrere Tage

Quelle: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX (vgl. [Burger 2012])

Windenergie

Für die Windstromerzeugung einer Klein-Windkraftanlage in der Stadt liegen zurzeit keine Mess- oder Simulationswerte vor, daher werden die Auswirkungen von Klein-Windkraftanlagen auf das elektrische Netz in Anlehnung an die Daten der Windstromerzeugung Deutschlands für das Jahr 2011 betrachtet. Bild 54 zeigt die von [Burger 2012] ausgewerteten Daten der EEX (European Energy Exchange) für das Jahr 2011. Zu beachten ist hierbei, dass diese Produktion Summenwerte für Deutschland darstellt und so für die Betrachtung der Energieerzeugung einer Einzelanlage in kurzen Zeitintervallen kaum geeignet ist.

Die Fluktuation der Windenergie unterscheidet sich wesentlich von der Fluktuation des Solarstromes. Während Solarstrom verstärkt im Sommer mit einem typischen Tagesgang produziert wird, fällt im Winter tendenziell mehr Windstrom an (vgl. Bild 54), und die Erzeugung folgt keinem typischen Tagesgang (vgl. Bild 53). Für einen einzelnen Standort ist mit einer stärkeren Fluktuation der Windenergie zu rechnen, als in der Darstellung der Tagesgänge in Bild 53 ablesbar ist. Für das Passivhaus mit Energiegewinn bedeutet dies, dass abhängig von der Größenordnung der Windkraftanlage(n) zu unterschiedlichsten Zeiten elektrische Energie aus Windkraft verfügbar ist. Da die Umsetzung von Klein-Windkraftanlagen an Gebäuden wahrscheinlich nur in einer kleiner Größenordnung mit nur wenigen 100 W bis zu einigen kW installierter Leistung pro Gebäude realisiert werden kann, sind bei Betrachtung der eingespeisten Energiemengen die Auswirkungen der Klein-Windkraftanlagen auf das elektrische Netz als deutlich geringer einzuschätzen als die

der Photovoltaik. Es ist zu erwarten, dass die Windkraft besonders im Winter zum zeitlichen Ausgleich der Energiebilanz des Gebäudes beiträgt und somit den Effekt der Nutzung des elektrischen Netzes als „saisonalen Speicher“ durch die Photovoltaik etwas verringern kann.

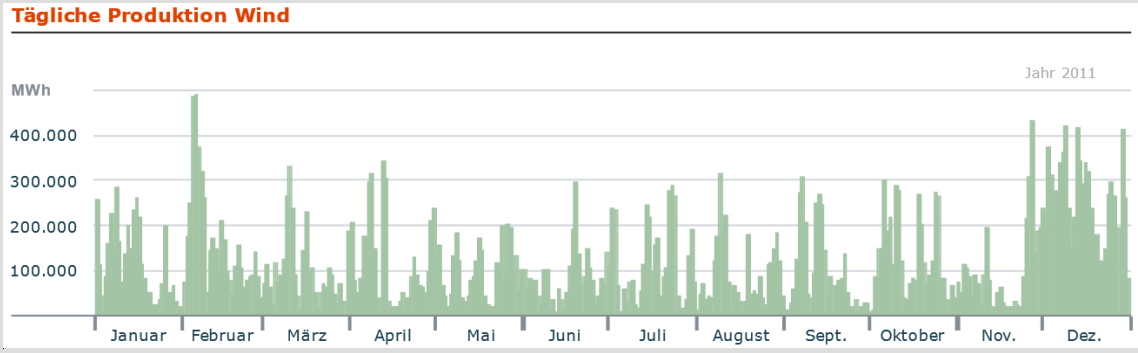


Bild 54: Tägliche Energiemengen der Windenergieerzeugung in Deutschland

Quelle: B. Burger, Fraunhofer ISE; Daten: Leipziger Strombörse EEX (vgl. [Burger 2012])

Kraft-Wärme-Kopplung mit regenerativen Energieträgern

Die elektrische Energieproduktion in Form von Kraft-Wärme-Kopplung erfolgt unter anderen Randbedingungen als bei den bisher dargestellten regenerativen Energieerzeugern. Im Fall der KWK wird ein regenerativer Energieträger zu dem Zeitpunkt, zu dem er benötigt wird, zur Wärme- und Stromproduktion genutzt. Der Zeitpunkt der Erzeugung ist daher nicht direkt von äußeren Randbedingungen wie Solarstrahlung oder Windgeschwindigkeit abhängig, sondern von der Regelung der entsprechenden Energieerzeuger. Abhängig von der Betriebsweise der KWK-Anlage wird die elektrische Energie bei der wärmegeführten Betriebsweise als „Zusatzprodukt“ zur Wärme, daher abhängig von der benötigten Wärme erzeugt. Bei der stromgeführten Betriebsweise wäre dies umgekehrt. Wie bereits in Kapitel 4.1.4 beschrieben, eignet sich für ein Passivhaus mit Energiegewinn besonders die wärmegeführte Betriebsweise, da in diesem Fall ein geringerer Brennstoffeinsatz vorliegt und auf diese Weise das Biomassepotenzial eingehalten werden kann, wenn zur weiteren Reduktion des Brennstoffeinsatzes eine solarthermische Anlage eingesetzt wird. Bild 55 zeigt exemplarisch die sich in diesem Fall ergebende elektrische Energieerzeugung durch ein BHKW.

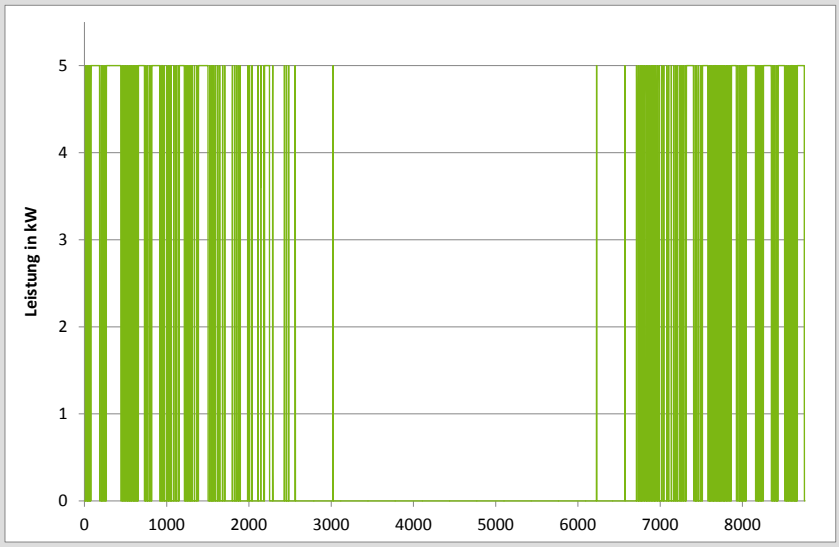


Bild 55: Simulationsergebnisse der elektrischen Energieerzeugung eines BHKWs eines PH+E für ein Jahr (bei zusätzlicher Wärmeerzeugung einer solarthermischen Anlage)

Wesentlicher Vorteil dieses Konzeptes ist, dass das BHKW nur zu Zeiten betrieben wird, zu denen aufgrund fehlender solarer Einstrahlung zu wenig solarthermische Wärme und gleichzeitig auch nur wenig Photovoltaikstrom produziert wird. Auf diese Weise wird der regenerative Energieträger daher hauptsächlich zu Zeiten eingesetzt, zu denen Wärme und Strom im Gebäude benötigt werden und trägt so im Tages- wie auch im Jahresverlauf wesentlich zur Entlastung des elektrischen Netzes bei. Aufgrund der vergleichsweise konstanten Stromkennzahl der Anlage ist das Verhältnis von Wärme- und Stromerzeugung festgelegt.

4.2.5 Gegenüberstellung der Techniken der Stromerzeugung

In Tabelle 17 werden die dargestellten elektrischen Energieerzeuger noch einmal zusammenfassend verglichen.

Tabelle 17: Gegenüberstellung verschiedener elektrischer Energieerzeuger

	Photovoltaik	BHKW	Klein-Windkraft
Vorteile	- sehr hohe Energieerzeugung am Standort abhängig von den verfügbaren Flächen möglich	- Energieerzeugung zu Zeiten, zu denen andere regenerative Energieerzeuger keinen Strom erzeugen	- ergänzt die Energieerzeugung des Gebäudes
Nachteile	- starke Abhängigkeit der Energieerträge von Ausrichtung, Neigung und Verschattung der Anlagen	- Nutzung eines (regenerativen) Brennstoffs, Betriebsführung des BHKWs muss auf eine möglichst sparsame Nutzung dieses Brennstoffs ausgelegt sein, dies steht teilweise in Konkurrenz zur Wirtschaftlichkeit	- schwierige Prognose der Energieerträge, sehr starke Abhängigkeit vom Standort der Anlage (in der Stadt und auf dem Gebäude) - geringeres Potenzial als Photovoltaik - abhängig von der Art der Klein-WKA verstärkte Geräuschentwicklung möglich
Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes	Hoch	Mittel	Abhängig von der installierbaren Leistung, generell eher gering
Nutzungskonkurrenz	- Flächenkonkurrenz zu Solarthermie - die Kombination mit Klein-Windkraft muss in der Planung berücksichtigt werden	keine	Keine oder sehr geringe Flächenkonkurrenz zur Photovoltaik
Auswirkung auf das elektrische Netz			
Saisonal	Stromproduktion hauptsächlich im Sommer, Erzeugung großer Überschüsse im Hochsommer	Energieproduktion hauptsächlich im Winter	Stromproduktion zu sehr unterschiedichen Zeiten, tendenziell im Winter höher
im Tagesgang	Stromproduktion hauptsächlich zur Mittagszeit	Abhängig von der Betriebsweise/ Regelung	Stärker über den Tag verteilt als Photovoltaik

5 Parameterstudie für Passivhäuser mit Energiegewinn

Dass Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn realisiert werden können, zeigt bereits das Modellprojekt in der Cordierstraße 4 in Frankfurt (vgl. [Schaede, Großklos 2013]), bei dem trotz teilweise schwieriger Randbedingungen das Ziel des Energieüberschusses erreichen werden konnte.

In diesem Kapitel werden nun anhand verschiedener Parametervariationen die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen des Mehrfamilienhauses als PH+E dargestellt.

5.1 Vorstellung der Modellgebäude

Die Modellgebäude sind typische, städtische Mehrfamilienhäuser die häufig in Zeilenbebauung ausgeführt werden. Es werden Gebäude mit unterschiedlicher Anzahl von Stockwerken (2, 4, 5, 7) betrachtet (vgl. Bild 56), jeweils mit vier Wohnungen pro Etage[13].

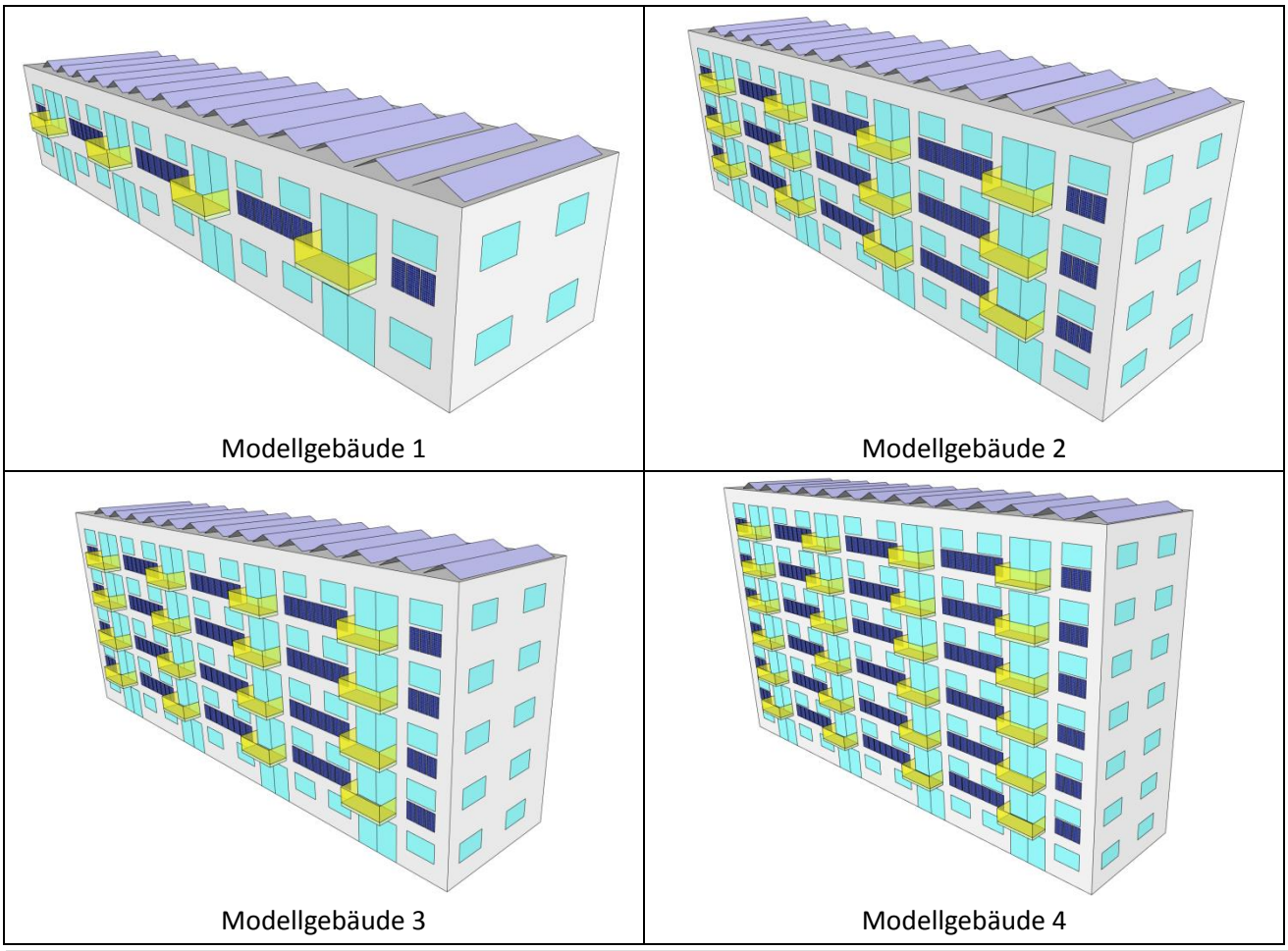


Bild 56: Darstellung der Modellgebäude 1 bis 4 (bei den dunkelblauen Flächen an der Fassade und die blauen Flächen auf dem Dach handelt es sich um PV-Anlagen)

[13] Die in Bild 56 dargestellten Balkone sind mit ihrer Verschattung bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs berücksichtigt. Bei den Erträgen der PV-Fassade wurde deren Verschattung nicht explizit berücksichtigt, hier ist es Aufgabe des Planers, eine weitgehend verschattungsfreie Lösung beim Gebäudeentwurf zu wählen. Jedoch wird in Kapitel 5.2.4 eine verhältnismäßig hohe Verschattung der Fassade berücksichtigt, für die weiteren Berechnungen wird dies beibehalten.

Die Anzahl der Wohnungen pro Etage hat keine wesentlichen Auswirkungen auf die hier dargestellten Betrachtungen: Eine Erhöhung der Wohnungen pro Etage würde das Gebäude verlängern. Der Heizwärmebedarf wäre in diesem Fall aufgrund der geringeren Außenwandfläche pro m² Wohnfläche leicht geringer, während alle anderen Größen, z. B. die zur solaren Energieerzeugung zur Verfügung stehenden (Dach-)Flächen im Verhältnis zur Wohnfläche gleich bleiben würden. Die weiteren Randbedingungen wurden in Anlehnung an typische, in der Stadt vorzufindende Gebäude definiert (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19).

Tabelle 18: Gebäudedaten der Modellgebäude

	Gebäude 1	Gebäude 2	Gebäude 3	Gebäude 4
Geschosse	2	4	5	7
Wohneinheiten	8	16	20	28
Wohnfläche	560 m²	1120 m²	1400 m²	1960 m²
Projektierte Personenzahl	16	32	40	56
Energiebezugsfläche	566 m²	1132 m²	1415 m²	1981 m²
Dachfläche	351 m²			
davon für solare Energieerzeugung nutzbar	246 m²			
Gebäudemaße (Außenmaß thermische Hülle)				
Höhe	7,1 m	13,5 m	16,7 m	23,1 m
Geschosshöhe	3,2 m			
Breite	9 m			
Länge	39 m			
Fensterflächen				
Süd	77,6 m²	155,2 m²	194 m²	271,6 m²
West	5,6 m²	11,2 m²	14 m²	19,6 m²
Nord	24 m²	48 m²	60 m²	84 m²
Ost	5,6 m²	11,2 m²	14 m²	19,6 m²
U-Werte der Bauteile				
Außenwand	0,10 W/(m²K)			
Kellerdecke	0,11 W/(m²K)			
Dach	0,10 W/(m²K)			
Fenster (Durchschnitt, inkl. Einbauwärmebrücken)	0,83 W/(m²K)			
Wärmebrückenzuschlag	0,014 W/(m²K)	0,011 W/(m²K)	0,10 W/(m²K)	0,009 W/(m²K)
Anlagentechnik				
Effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlagen	80,9 %			
Drucktest Luftwechsel n50	0,4 1/h			
Dämmung der Rohrleitungen	250 % nach EnEV			

Wärmeerzeugung				
Solarthermie (ST) Aperturfläche CPC-Kollektoren	13,6 m²	27,2 m²	34 m²	47,6 m²
Pufferspeicher	2400 l	4800 l	6000 l	8400 l
BHKW Wirkungsgrad	η_{therm} = 74 % η_{el} = 26 %			
Stromerzeugung				
Photovoltaik Dach (η=20%) Ost-/West- Aufstellung	202,2 m² / 41,30 kWp	176,1 m² / 36,00 kWp	166,3 m² / 33,97 kWp	143,5 m² / 29,30 kWp
Photovoltaik Fassade (η=11%) Südausrichtung	37,7 m² / 4,14 kWp	123,7 m² / 13,57 kWp	166,7 m² / 18,29 kWp	252,7 m² / 27,73 kWp

Tabelle 19: Randbedingungen der Bilanzierung, die bei den Parametervariationen variiert werden

Gebäude 1-4	Dach	Verschattung		Anlagen-technik	Ausrich-tung	Standort	Innen-temp.	WWver-brauch
		Dach	Fassade					
Referenz	Flach-dach	keine	keine	ST & BHKW	Süd	Frankfurt am Main	20 °C	33 l bei 48 °C[14]

Für die Wohnungen wird jeweils eine Wohnfläche von 70 m² angenommen, belegt mit zwei Personen pro Wohnung. Dies entspricht einer pro-Kopf Wohnfläche von 35 m². Aktuelle Statistiken zeigen, dass die Wohnfläche pro Person in Deutschland mit 45 m² je Person höher liegt [BiB 2013]. In der Energiebilanz des Passivhaus Projektierungs-Paketes macht sich eine erhöhte Belegungsdichte hauptsächlich im Warmwasserverbrauch anhand eines höheren Energiebedarfs bemerkbar. Im Falle des PH+E bedeutet dies, dass bei Annahme einer zu geringen Wohnfläche pro Kopf der Wärmebedarf des Gebäudes eher zu hoch eingeschätzt wird.

Die Gebäudebreite wurde mit 9 m angesetzt (Außenmaß), aufgrund der Wohnflächen, der Erschließung über innen liegende Treppenhäuser (Zweispänner) und der Stärke der Außenwände, ergibt sich so bei vier Wohnungen à 70 m² pro Stockwerk eine Länge des Gebäudes von 39 m. Die Gebäude besitzen einen Keller, der außerhalb der thermischen Hülle liegt, hierin befinden sich die Anlagentechnik sowie Abstellräume. Das Dach der Gebäude ist als Flachdach ausgebildet. Es wird eine Geschosshöhe von 3,20 m angenommen, dies entspricht einer lichten Deckenhöhe von ca. 2,60 m. Innerhalb der Decke werden Leitungen, insbesondere Lüftungsleitungen verlegt. Auf der Südseite befindet sich eine große Fensterfront für die Wohnräume, auf den anderen Gebäudeseiten jeweils kleinere Fenster für die Nebenräume. Die Gebäude besitzen Passivhaus-geeignete Bauteile und erreichen den Passivhausstandard. Das kleinste Gebäude erreicht den Passivhausstandard nur knapp, mit zunehmender Gebäudegröße sinkt der Heizwärmebedarf. Die Gebäude sind mit einer zentralen Warmwasserversorgung ausgestattet, bei der die Verluste der Warmwasserverteilung durch erhöhte Dämmung der Rohrleitungen, Absenkung der Warmwassertemperatur und ein Rohr-in-Rohr-System reduziert werden. Es sind wohnungsweise dezentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung installiert. Abhängig von der gewählten Anlagentechnik wird nach Belegung des Daches mit solarthermischen Kollektoren zur Deckung von 60 % der Warmwasserbereitung, die restliche Dachfläche mit Photovoltaikmodulen in Ost-/West-Ausrichtung für bestmögliche Ausnutzung der Dachfläche ausgestattet. Von der Südfassade werden ab dem 2. Stockwerk nach Abzug der Fensterfläche 50 % der Fassadenfläche mit Photovoltaik-Fassadenmodulen ausgestattet.

[14] Entspricht dem Ansatz von 25 Litern/Person und Tag im PHPP bei 60 °C Warmwasser-Temperatur

Die Modellgebäude werden unter dem Einsatz verschiedener Anlagentechniken betrachtet. Als Referenzvariante wird eine solarthermische Anlage in Kombination mit einem mit Biomethan betriebenen Blockheizkraftwerk mit Brennwertnutzung (Stromkennzahl 0,35) zur alleinigen Wärmeerzeugung genutzt (kein Spitzenlastkessel vorhanden). Die Erzeugung elektrischer Energie erfolgt größtenteils durch die Photovoltaikanlagen auf dem Dach (Flachdach, Ost-/West-ausgerichtete Aufständerung der PV) und an der Fassade und wird durch die Stromerzeugung des BHKWs noch leicht erhöht. Tabelle 20 stellt die verwendeten Primärenergiefaktoren und Werte für CO_2-Äquivalente verschiedener verwendeter Energieträger dar.

Tabelle 20: verwendete Primärenergie- und Treibhausgas-Emissionsfaktoren für die Beispielrechnungen

	Primärenergie [kWh_{PE}/kWh_{End}]	THG-Emissionen [g/kWh_{End}]
Strommix Deutschland	2,21	594
Photovoltaik-Strom	0,4	92
Biomethan	0,3	200

Für den Referenzfall werden die Gebäude mit einer Südausrichtung am Standort Frankfurt am Main betrachtet.

5.2 Parametervariationen

Anhand von Parametervariationen zu Gebäudegröße, -ausrichtung, -verschattung, Dachneigung, Anlagentechnik, Bedarf für Warmwasser und Heizenergiebedarf sowie Standort werden in diesem Kapitel die wesentlichen Einflussgrößen auf das PH+E beschrieben. Als Ausgangsfall werden die verschiedenen Gebäudegrößen unter den bereits beschriebenen Randbedingungen mit ihren Ergebnissen dargestellt. Als Größen werden hier der Nutzenergiebedarf für Wärme und elektrische Energie dargestellt, die Stromerzeugung des Gebäudes, der Bezug von Biomasse sowie schließlich die sich aus der Energiebilanz ergebenden Bedarfswerte bzw. Überschüsse bei Stromerzeugung, Primärenergie und Treibhausgas-Emissionen (CO_2).

5.2.1 Einfluss der Gebäudegröße

Bild 57 und Bild 58 zeigen den Einfluss der Gebäudegröße der vier Modellgebäude unter Verwendung der Referenzvariante der Anlagentechnik Solarthermie, BHKW und Photovoltaik.

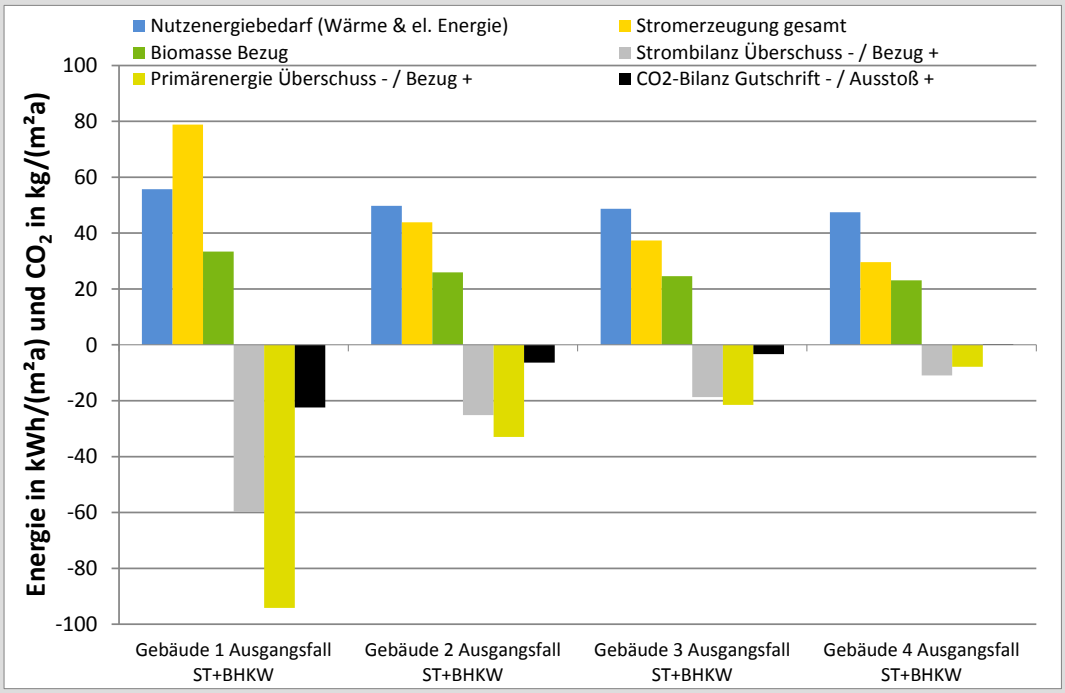


Bild 57: Einfluss der Größe der Modellgebäude, Referenzfall Anlagentechnik mit Solarthermie, Blockheizkraftwerk und Photovoltaik

Zwischen Gebäudegröße und den dargestellten Kennwerten zeigen sich folgende Zusammenhänge:

- Der Nutzenergiebedarf pro m^2_{EBF} sinkt leicht von 55,7 kWh/(m²a) (Gebäude 1) auf 47,5 kWh/(m²a) (Gebäude 4) mit zunehmender Gebäudegröße. Ursache ist der geringere Heizwärmebedarf aufgrund des besseren A/V-Verhältnisses.
- Die elektrische Energieerzeugung nimmt mit zunehmender Gebäudegröße stark ab (von 78,8 kWh/(m²a) auf 29,6 kWh/(m²a)), da die zur Verfügung stehenden Flächen für die solare Energieerzeugung nur geringfügig mit der Gebäudegröße zunehmen. Die Dachfläche aller Modellgebäude ist gleich, die Anzahl der Stockwerke wird erhöht, damit nimmt lediglich die vorhandene Fassadenfläche zur Nutzung von Photovoltaik leicht zu.
- Der Bedarf an Biomasse pro m^2_{EBF} für das wärmegeführte BHKW nimmt mit steigender Gebäudegröße aufgrund des abnehmenden Heizwärmebedarfs ab (von 33,4 kWh/(m²a) auf 23,1 kWh/(m²a)).
- Der Stromüberschuss nimmt mit zunehmender Gebäudegröße aufgrund der sich stark verringernden Stromerzeugung ab (von -59,8 kWh/(m²a) auf -11,0 kWh/(m²a)).
- Der Primärenergieüberschuss sinkt mit steigender Gebäudegröße als Folge des Zusammenspiels aller Faktoren, insbesondere aufgrund der deutlich geringeren elektrischen Energieproduktion durch Photovoltaik bei großen Mehrfamilienhäusern von -94,1 kWh/(m²a) auf -7,8 kWh/(m²a).
- Analog dem Primärenergieüberschuss sinkt auch die CO_2-Gutschrift mit steigender Gebäudegröße (von -22,4 kg/(m²a) auf -0,3 kg/(m²a)), so dass Modellgebäude 4 nur knapp eine ausgeglichene Bilanz aufweisen kann

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.

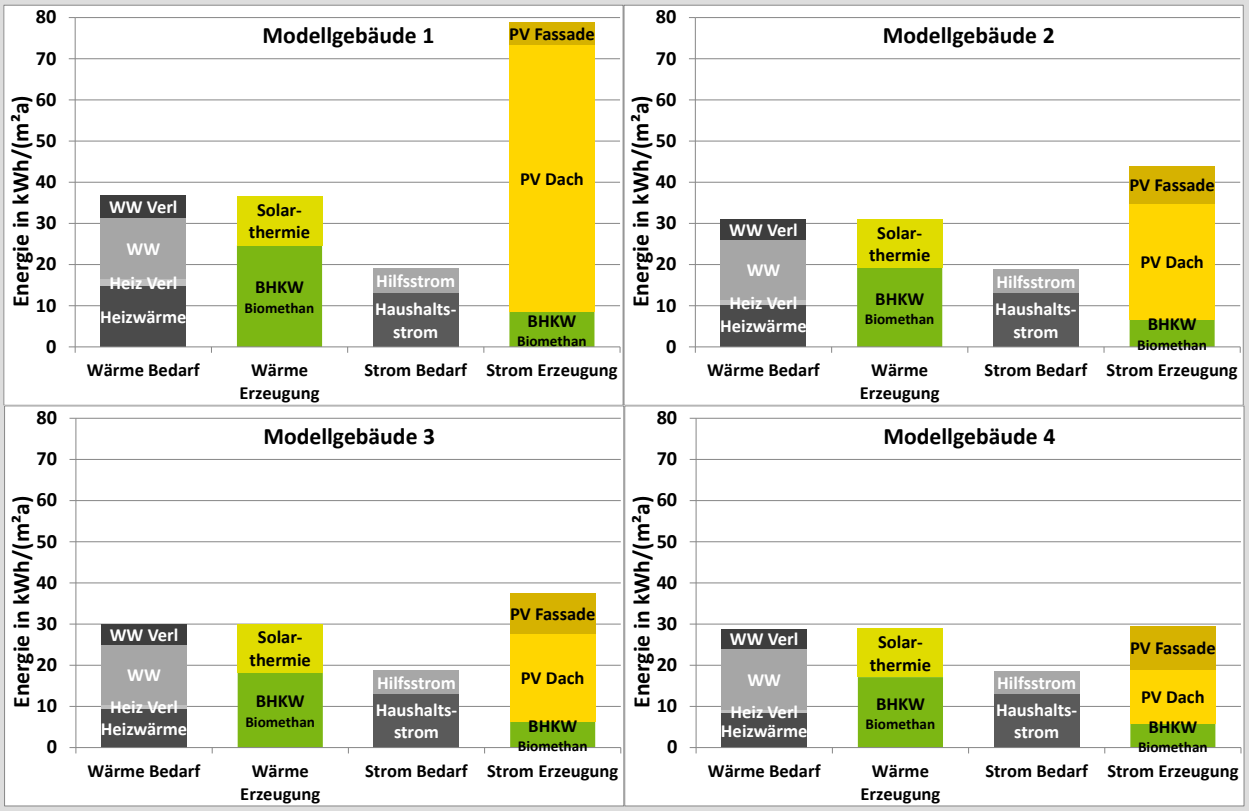


Bild 58: Energiebilanz der Modellgebäude mit der Anlagentechnik Solarthermie, Blockheizkraftwerk und Photovoltaik

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. Dies zeigt auch die Praxis der aktuell in Planung und Umsetzung befindlichen Mehrfamilienhäuser der Modellvorhaben zum EffizienzhausPlus des BMVBS, die in der Jahresbilanz einen Energieüberschuss erreichen sollen. Deren energetischer Standard ist vergleichbar dem Passivhausstandard.

Gleichzeitig zeigt das Bild 57 jedoch auch, welche hohen Energiegewinne bei kleineren Gebäuden (Modellgebäude 1 und 2) 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 wird häufig auf weniger effiziente, aber kostengünstigere Photovoltaik als in den hier dargestellten Beispielrechnungen gesetzt. Weiterhin wird in der Praxis bei kleinen Gebäuden, die einen Energieüberschuss erzielen sollen, nur selten der Passivhausstandard umgesetzt, da ein erhöhter Energiebedarf durch Photovoltaikerzeugung auf den in genügender Größe zur Verfügung stehenden Flächen kompensiert werden kann. Auf der anderen Seite besteht kein Anreiz, besonders große Energiegewinne zu realisieren.

Trotz dieser sehr unterschiedlichen und für kleine Mehrfamilienhäuser zurzeit vermutlich selten umgesetzten Randbedingungen von Gebäuden mit Energieüberschuss, wird für die weiteren Untersuchungen zur besseren Vergleichbarkeit bei allen Gebäudegrößen eine gleich hohe Effizienz beibehalten.

5.2.2 Dachneigung – Auswirkungen auf die Photovoltaikerzeugung

Abhängig von Dachneigung und Dachausrichtung ergibt sich der maximal mögliche Photovoltaik-Ertrag, der für die ausgeglichene Jahresbilanz des Gebäudes eine sehr wichtige Rolle spielt. Daher soll dieser hier als wichtiger Einflussfaktor zuerst betrachtet werden. Bild 59 zeigt den jährlichen Photovoltaikertrag in kWh/(kWp*a) einer Anlage mit hocheffizienten Kollektoren bei unterschiedlicher Ausrichtung und Neigung. Da der Ertrag pro kWp dargestellt wird, kann dies auch als Anhaltswert für andere Photovoltaik-Module genutzt werden, da sich eine geringere Effizienz der Module hauptsächlich in einer größeren benötigten Photovoltaik-Fläche pro kWp ausdrückt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund unterschiedlicher Technologien (z. B. der Nutzung monokristalliner oder polykristalliner Zellen), Photovoltaikmodule unterschiedlich auf diverse Faktoren wie z. B. diffuse Strahlung und Erwärmung reagieren.

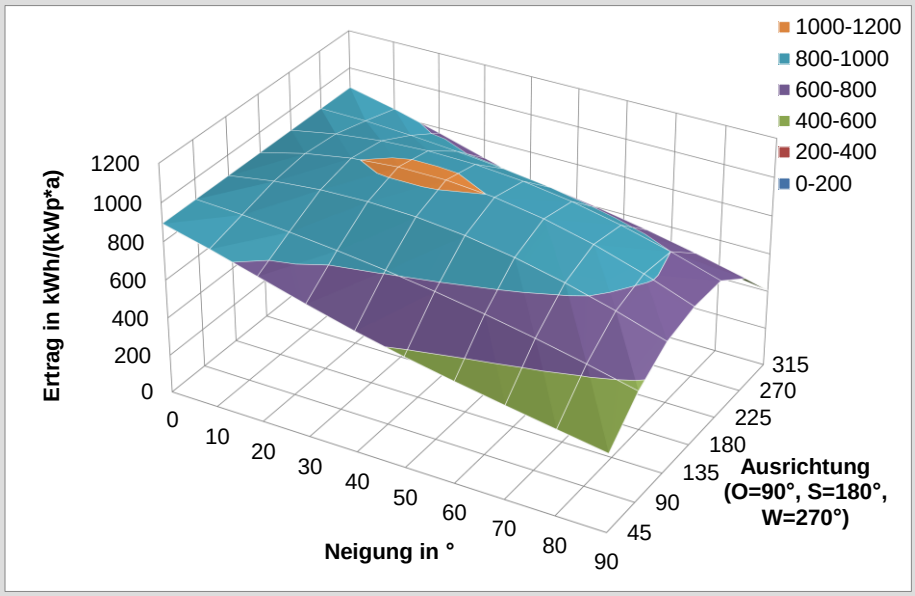


Bild 59: Photovoltaik-Ertrag auf dem Dach in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung der Photovoltaikmodule (ohne Berücksichtigung von Verschattung)

Die in Bild 59 dargestellten Erträge hocheffizienter Photovoltaik-Module werden im Zuge der Parameterstudie genutzt. Sie liegen bei Südausrichtung und einem Anstellwinkel von 30° bis 40° am höchsten und fallen insbesondere bei senkrechter Montage (90°) und Ost- oder Westorientierung (90° bzw. 270°) stark ab.

Im Folgenden werden nun verschiedene Varianten der Dachneigung und -ausrichtung des Modellgebäudes dargestellt. Alle Modellgebäude besitzen die gleiche Dachfläche, für den dargestellten Fall wurde der mögliche Ertrag aus der Nutzung des gesamten Daches für Photovoltaik errechnet (keine Solarthermie vorhanden). Dabei sind Abstandsflächen zum Dachrand, bzw. bei einem Flachdach für die Begehbarkeit berücksichtigt. Es werden verschiedene Varianten der Dachnutzung, das Pultdach sowie das Flachdach in verschiedenen Ausrichtungen und teilweise verschiedener Aufständerung der Photovoltaik dargestellt. Der Photovoltaik-Ertrag eines Daches ist nicht nur von der Effizienz der verwendeten Photovoltaikmodule abhängig, sondern ganz entscheidend auch von der effizienten Nutzung der zur Verfügung stehenden Dachfläche. Daher kommt es vor, dass eine nicht optimale Ausrichtung der Photovoltaikmodule zur Erhöhung des Energieertrages aus dem Dach vorteilhaft sein kann, wenn dadurch wesentlich mehr Module installiert werden können. Ab einem gewissen Punkt ist aus ökonomischer Sicht und auch aus Sicht des Ressourcen-

verbrauchs eine zu starke Ertragseinbuße pro kWp installierter Leistung aufgrund einer verschlechterten Ausrichtung nicht mehr zielführend. Aus diesem Grund werden in den folgenden Variationen maximale Ertragseinbußen von 15 % bezogen auf die erzielbaren Erträge pro kWp aufgrund einer verschlechterten Neigung und Ausrichtung hingenommen. Ziel der hier dargestellten Betrachtung ist es vorrangig, den Energieertrag der Photovoltaikflächen auf dem Dach zu erhöhen, um das Gesamtziel des Energieüberschusses des Gebäudes zu erreichen. Dargestellt werden die Ergebnisse als Absolutwert in kWh/a für die Nutzung des gesamten Daches (351 m² brutto, 246 m² netto) für Photovoltaik.

Der größte Photovoltaikertrag wird bei nach Süden ausgerichtetem Pultdach erreicht (vgl. Bild 60). Mit Erhöhung der Neigung steigt zum einen der Photovoltaikertrag pro kWp (optimale Modulneigung bei Südausrichtung beträgt ca. 30°), zum anderen erhöht sich mit stärkerer Dachneigung die zur Verfügung stehende Dachfläche und es können mehr Photovoltaikmodule, d. h. mehr Leistung in kWp installiert werden. Im Verhältnis zu dem optimal erzielbaren Ertrag bei einem Süd-ausgerichteten Pultdach von ca. 30° kann bei einem 10° geneigten Pultdach nur ein um 28 % geringerer Ertrag erreicht werden, hauptsächlich aufgrund der geringeren installierbaren Leistung auf dem Dach.

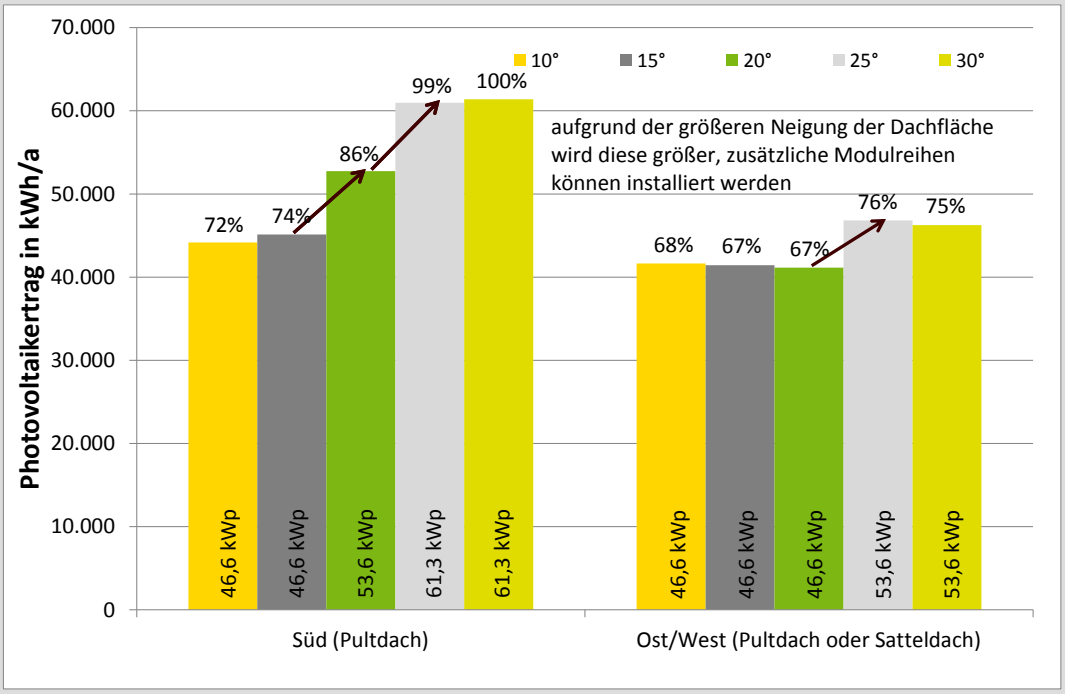


Bild 60: Photovoltaik-Ertrag eines Pultdaches in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung (100 % Ertrag entspricht einer Anlage mit 61,3 kWp und 30 ° Neigung)

Zusätzlich dargestellt wird auch der Ertrag eines Pultdachs, das nach Ost oder West ausgerichtet ist. Da der Photovoltaikertrag von nach Osten und Westen ausgerichteten Flächen sehr ähnlich ist, können die Erträge auch für Ost-/West-ausgerichtete Satteldächer angenommen werden. Im Gegensatz zur Südausrichtung eines Pultdachs sinkt der Photovoltaikertrag eines Ost-/ West-ausgerichteten Daches mit zunehmender Neigung. Hauptursache ist der abnehmende Energieertrag pro kWp installierter Leistung. Bei Ost-/West-Ausrichtung der Module kann mit steigender Neigung immer weniger der Mittagssonne mit Strahlung der größten Intensität verwertet werden (vgl. Bild 59). Mit einem Ost-/West- ausgerichteten Pultdach oder Satteldach kann in diesem Beispiel abhängig von der Nutzbaren Dachfläche und Neigung nur maximal ein 76 % des Ertrags eines optimal nach Süden ausgerichteten Pultdachs erzielt werden. Ein für die Photovolta-

ik-Erzeugung optimal nach Süden ausgerichtetes Pultdach ist meist nur bei nach Süden ausgerichteten Gebäuden möglich. Teilweise wird dies im Bebauungsplan neuer Baugebiete mittlerweile schon berücksichtigt. Dabei wird bei einem Pultdach aber auch der Anteil der nach Norden orientierten Wandfläche vergrößert. Ist eine Südausrichtung des Daches oder auch eine Ausführung als Pultdach aufgrund gestalterischer Anforderungen nicht erwünscht, kann daher über das Dach etwas weniger Ertrag erzielt werden.

Bild 61 zeigt die Energieerträge eines Flachdachs, mit nach Süden aufgeständerten Modulen und zum Vergleich mit Ost/West aufgeständerten Modulen. Da bei der Aufständerung 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. Weiterhin 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[15]. 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 auf dem nur 9 m breiten Dach des Modellgebäudes weniger Modulreihen installiert werden können. Dies zeigt einmal mehr die Bedeutung der individuellen Planung einer Photovoltaikanlage, um die Dachfläche optimal ausnutzen zu können.

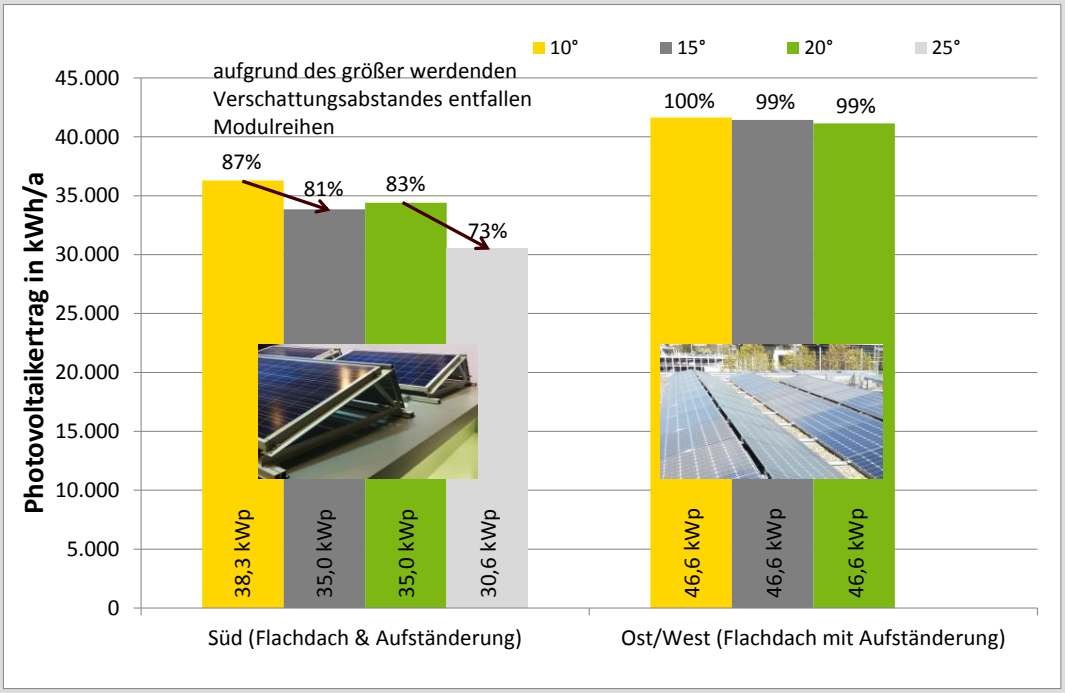


Bild 61: Photovoltaik-Ertrag eines Flachdaches in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung (100 % Ertrag entspricht einer Anlage mit 46,6 kWp und 10 ° Neigung)

Im Vergleich zu einem geneigten Pultdach erzielt ein Flachdach einen geringeren Ertrag. Im Vergleich zu einem 30° nach Süd geneigten Pultdach fällt der bestmögliche Ertrag des Flachdach in diesem Beispiel ca. 30 % geringer aus.

[15] Eine flache Montage (Neigungswinkel 0°) ist nicht sinnvoll, da dadurch die Selbstreinigung der Module und das Abrutschen von Schnee behindert werden.

5.2.3 Photovoltaik-Fassade

Photovoltaik-Fassaden werden bisher nur in begrenztem Umfang an Gebäuden installiert. Aktuell ist diese Technologie noch verhältnismäßig teuer, meist verbunden mit geringerem Wirkungsgrad der Module im Verhältnis zu üblichen Photovoltaik-Modulen für die Installation auf dem Dach. Fassaden-Photovoltaik benötigt eine spezielle Zulassung, die über die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung hinausgeht. Teilweise werden ganze Systempakete (Fassadendämmung, Befestigungen und Photovoltaik-Module als Vorhang-Fassade) angeboten, bei denen das Komplett-System zugelassen ist.

Bei kleinen Gebäuden wird zur Erreichung des Energiegewinns meist keine Photovoltaik an der Fassade benötigt, da Dachflächen in ausreichender Größe für die solare Energieerzeugung zur Verfügung stehen und daher aufgrund der beschriebenen Aspekte auf die Nutzung von Photovoltaik an der Fassade verzichtet wird. Für große Mehrfamilienhäuser hat die Fassaden-Photovoltaik zur Erreichung des Energiegewinns im Gegensatz dazu eine sehr wichtige Rolle. Aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden Dachflächen kommt mit zunehmender Gebäudegröße der Nutzung der Fassadenfläche zur solaren Energieerzeugung immer mehr Bedeutung zu. Große Mehrfamilienhäuser, bzw. Mehrfamilienhäuser mit vielen Stockwerken können ohne die Nutzung von Photovoltaik an der Fassade keinen Energiegewinn mehr erreichen.

Im Vergleich zur Photovoltaikanlagen auf dem Dach ist für die Photovoltaik an der Fassade die Ausrichtung des Gebäudes aufgrund der Neigung von 90° viel bedeutender. Bild 62 zeigt den Energieertrag der Photovoltaikfassade abhängig von der Ausrichtung des Gebäudes, bzw. seiner hauptsächlich für die Photovoltaikerzeugung genutzten Fassade. Der ist insgesamt deutlich niedriger als der der zuvor betrachteten Photovoltaik auf dem Dach. Gründe sind zum einen der deutlich geringere Wirkungsgrad der Fassaden-Photovoltaik von nur 11 % im Vergleich zu 20 % der hocheffizienten Module auf dem Dach. Zum anderen kann aufgrund der starken Neigung nur ein geringerer Ertrag pro installiertem kWp erzielt werden. Vergleicht man optimal nach Süden ausgerichtete Photovoltaikmodule wird bei der Fassaden-Photovoltaik mit einer Neigung von 90° ein 25 % geringerer Ertrag erreicht als bei Modulen auf dem Dach mit einer Neigung von 30°. Betrachtet man diese Ergebnisse bezogen auf die Modulfläche, bedeutet dies, dass bei Wahl der beschriebenen Module ca. die 2,5-fache Modulfläche an der Fassade installiert werden muss um den gleichen Ertrag zu erhalten wie mit den hocheffizienten Modulen auf dem Dach. Dieses Ergebnis ist jedoch, wie beschrieben, zum größten Teil von dem Wirkungsgrad der installierten Module abhängig.

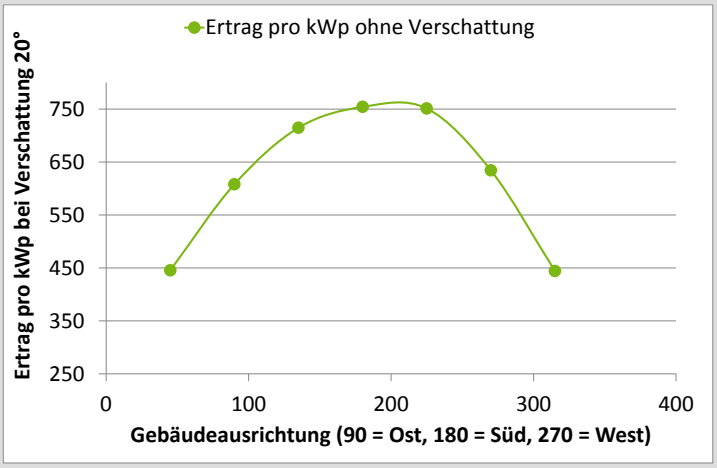


Bild 62: Ertrag der Photovoltaik-Fassade Abhängig von der Ausrichtung

Bild 63 zeigt die Aufteilung der elektrischen Energieerzeugung auf die einzelnen Anlagen, dargestellt für die vier Modellgebäude im Ausgangsfall mit der Anlagentechnik Solarthermie und Blockheizkraftwerk bei Südausrichtung. Für die Berechnungen wurden von der Südfassade der Gebäude ab dem 2. Stockwerk nach Abzug der Fenster 50 % der verbleibenden Fläche mit Photovoltaik-Fassadenmodulen ausgestattet. Die elektrische Energieerzeugung wird bei diesen Varianten durch das BHKW unterstützt.

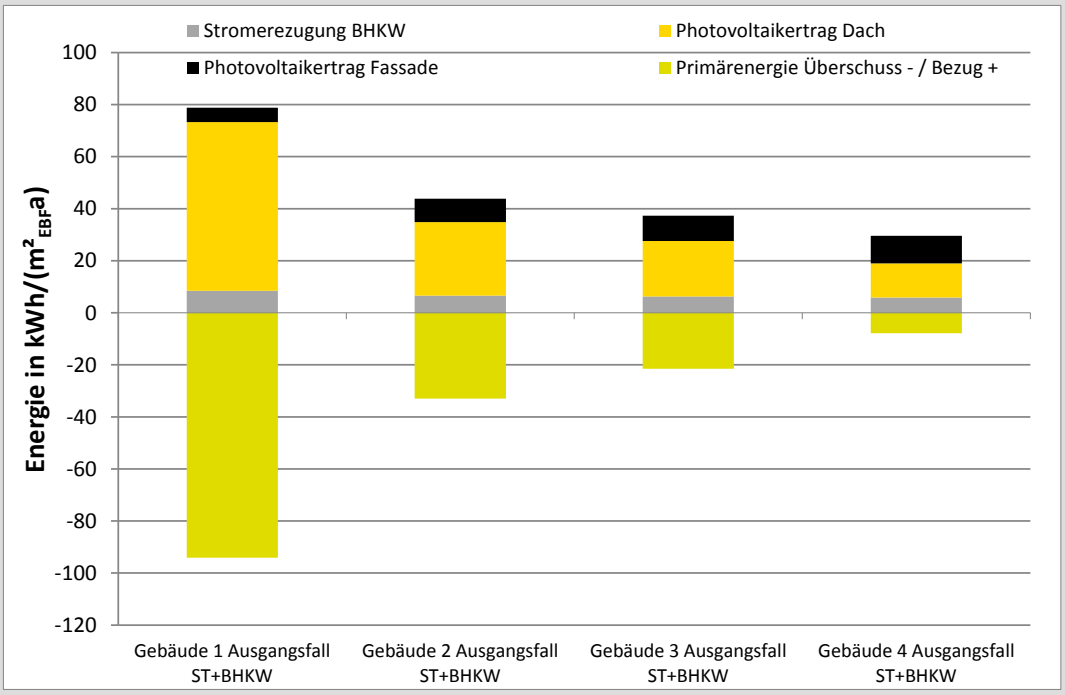


Bild 63: Aufteilung der elektrischen Energieerzeugung bei der Anlagentechnik Solarthermie und Blockheizkraftwerk

Aus der Darstellung wird der stark steigende Anteil der Energieerzeugung aus der Photovoltaik-Fassade an der gesamten Energieerzeugung des Gebäudes sichtbar. Die Energieerzeugung aus der Photovoltaik-Fassade steigt mit steigender Gebäudegröße leicht an, da diese Betrachtung unter der Annahme durchgeführt wurde, erst die Fassadenfläche ab dem zweiten Stockwerk zu nutzen, da die unteren Stockwerke zu stark durch die Nachbarbebauung verschattet sind. Ohne diese Einschränkung wäre die Energieerzeugung aus der Photovoltaik-Fassade, bezogen auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes, bei allen Modellgebäuden gleich.

Da alle Modellgebäude die gleiche Dachfläche besitzen, sinkt der auf die Energiebezugsfläche bezogene Photovoltaikertrag aus der Dachanlage mit steigender Gebäudegröße stark ab. Der Ertrag aus der Photovoltaik-Fassade, bezogen auf die Energiebezugsfläche, bleibt jedoch mit steigender Gebäudegröße auf ähnlichem Niveau, sein Anteil an der gesamten Energieerzeugung des Gebäudes steigt mit zunehmender Gebäudegröße und ist daher bei großen Gebäuden umso wichtiger. Um den Energieertrag großer Gebäude weiter zu erhöhen, könnte ggf. zusätzliche Photovoltaik an der Ost- und West-Fassade eines Gebäudes installiert werden. Hier sollte jedoch im Einzelfall der Aufwand (Kosten) im Verhältnis zum Nutzen betrachtet werden.

5.2.4 Verschattung des Gebäudes – Auswirkung auf Photovoltaik-Ertrag und Heizwärmebedarf

Die Modellgebäude wurden in Anlehnung an typische städtische Mehrfamilienhäuser ausgewählt, die häufig in Zeilenbebauung ausgeführt werden. Entscheidende Randbedingung für ein Gebäude mit Energiegewinn in einer innerstädtischen Lage ist die Verschattung. Verschattung tritt im Wesentlichen durch die umliegende Bebauung und durch Baumbestand auf. Für das spezielle Gebäude kann dies wesentliche Einschränkungen zur solaren Energieerzeugung mit sich bringen. Zusätzlich ist bei der Planung der Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung der Verschattung eine optimale Verschaltung der Anlage wichtig, da verschattete Module die Energieerzeugung des gesamten in Reihe geschalteten Strings der Module reduzieren. Eine Verschattung des Gebäudes hat weiterhin negative Auswirkungen auf die passiven solaren Gewinne des Hauses und erhöht dadurch den Heizwärmebedarf. Der Aspekt der Verschattung wird an dieser Stelle pauschal durch eine Verschattung der Photovoltaikanlagen auf dem Dach mit einem Horizontwinkel von 15° dargestellt (vgl. Bild 64). Die sich daraus ergebenden Photovoltaikerträge in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung sind in Bild 65 dargestellt.

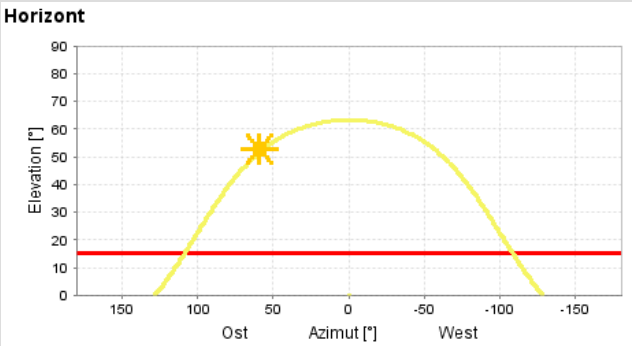


Bild 64: Horizontverschattung des Daches für Frankfurt am Main (21.06.)

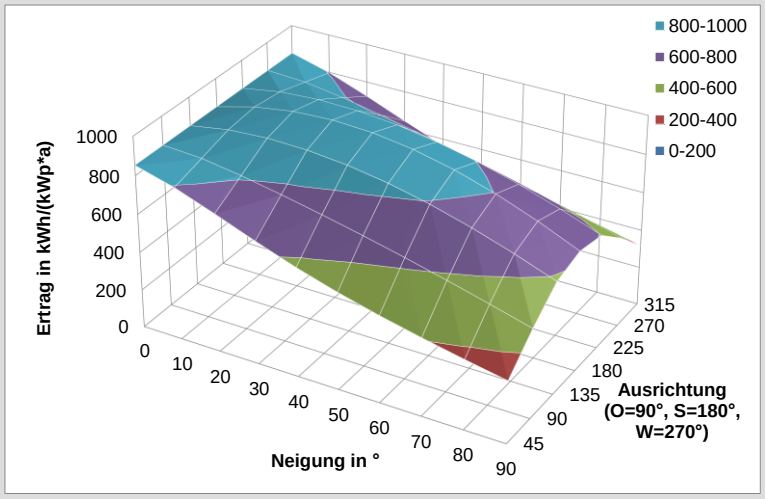


Bild 65: Photovoltaik-Ertrag auf dem Dach in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung der Photovoltaikmodule unter Berücksichtigung einer Verschattung von 15°

Für die Fassade muss aufgrund der umliegenden Bebauung eine höhere Verschattung berücksichtigt werden. Hier wird mit einem Winkel von 20° gerechnet, unter der Annahme, dass zur Energieerzeugung an der Fassade die dafür am besten geeignete Fassade genutzt wird. Der Sonnenlauf und die sich daraus ergebenden Erträge aus der Photovoltaik-Fassade sind in Bild 66 dargestellt. Die Verschattung der Fassade reduziert die Erträge der dort installierten Photovoltaik enorm. Eine detaillierte Verschattungsanalyse für Fassaden-Photovoltaik kann an dieser Stelle nicht durchgeführt werden, ist jedoch für das jeweilige Projekt von sehr

hoher Bedeutung, um das Potenzial der Photovoltaikerträge der Fassade realistisch in der Energiebilanz des Gebäudes berücksichtigen zu können. Der hier gewählte Ansatz der pauschalen Annahme der Verschattung soll diesen Aspekt jedoch bei den weiteren Parametervariationen berücksichtigen.

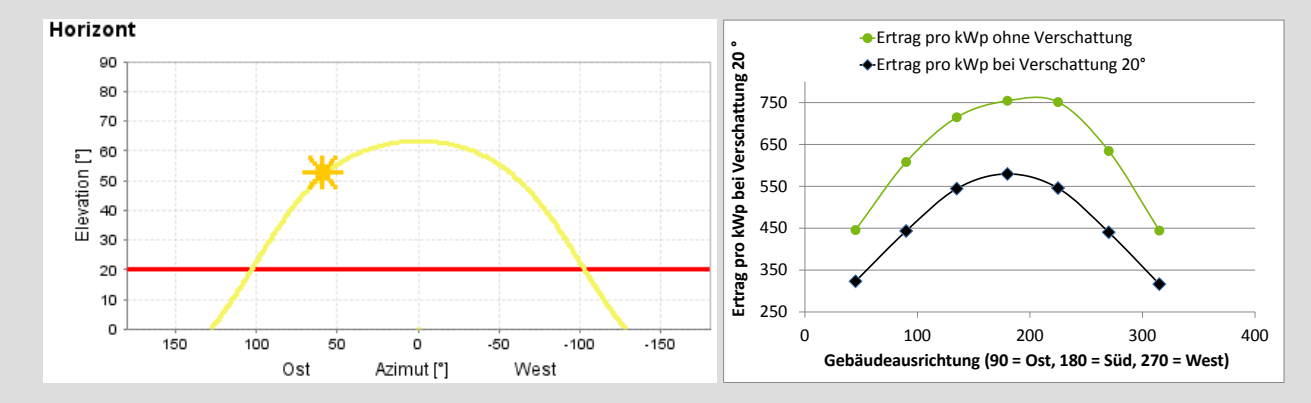


Bild 66: Verschattung der Fassade (Darstellung für 21.06.) und daraus resultierende Erträge abhängig von der Gebäudeausrichtung

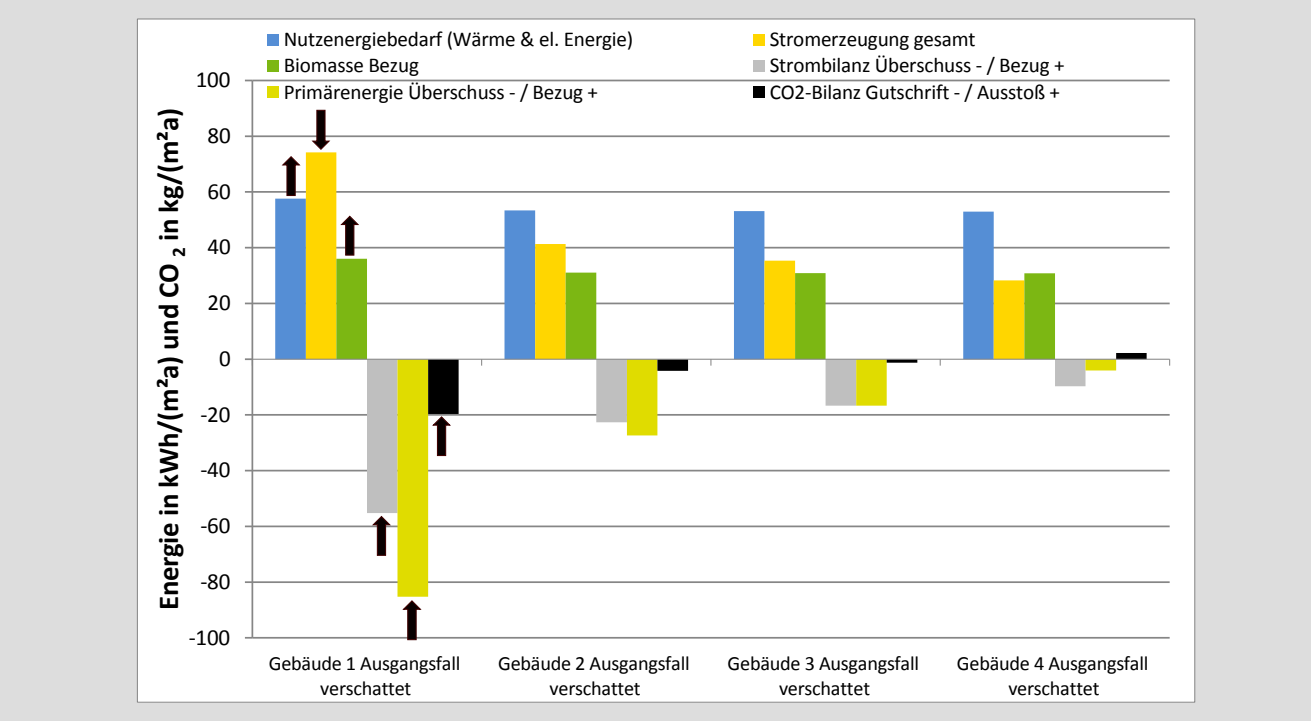


Bild 67: Auswirkungen einer typischen Verschattung auf die Modellgebäude

Gebäude 1-4	Dach	Verschattung PV Dach	Verschattung PV Fassade	Anlagen-technik	Ausrich-tung	Standort	Innen-temp.	WWver-brauch
Referenz	Flach-dach	15° Horizont	20° Horizont	ST & BHKW	Süd	Frankfurt am Main	20 °C	33 l bei 48 °C

Die Auswirkung der Verschattung des Gebäudes wird in der PHPP-Bilanz im Blatt Verschattung unter der Annahme berücksichtigt, dass die umliegende Bebauung die gleiche Gebäudehöhe aufweist und einen Ab-

stand von 20 m zum Gebäude besitzt. Unter diesen Randbedingungen ergeben sich für die Referenz-Modellgebäude die in Bild 67 dargestellten Ergebnisse.

Tabelle 21: Veränderung der Gebäudebilanz durch die Verschattung

		Gebäude 1	Gebäude 2	Gebäude 3	Gebäude 4
Nutzenergiebedarf	kWh/(m²a)	+1,9	+3,6	+4,4	+5,5
Stromerzeugung gesamt	kWh/(m²a)	-4,6	-2,5	-2,0	-1,3
Biomasse Bezug	kWh/(m²a)	+2,6	+5,1	+6,2	+7,7
Strombilanz	kWh/(m²a)	+4,6	+2,5	+2,0	+1,2
Primärenergie	kWh/(m²a)	+8,9	+5,6	+4,8	+3,7
CO2 / THG Ausstoß	kg/(m²a)	+2,8	+2,2	+2,1	+2,0

Tabelle 21 zeigt die Veränderung der Gebäudebilanz durch die Verschattung. Die erzielbaren Photovoltaikerträge von Dach und Fassade sinken. Der Heizwärmebedarf aller Gebäude und damit auch der Bedarf an Biomasse steigt leicht an, kann aber aufgrund der guten Gebäudehülle im Passivhausstandard weiterhin auf geringem Niveau gehalten werden. Im Ergebnis sinkt durch den höheren Energiebedarf und die geringere Erzeugung der Energiegewinn der Gebäude, der Primärenergieüberschuss fällt niedriger aus.

Da die typischerweise vorhandene Verschattung wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz der Gebäude hat, wird sie für die weiteren Betrachtungen in dem hier dargestellten Maß berücksichtigt.

5.2.5 Vergleich von Anlagentechnik-Konzepten

Für Gebäude mit Energiegewinn kommen verschiedene Anlagentechniken in Frage, die im Einzelnen bereits in Kapitel 3 dargestellt wurden. An dieser Stelle werden aktuell denkbare Anlagentechnik-Konzepte zur Erreichung des Energiegewinns dargestellt. Die Ergebnisse werden für die in Kapitel 5.1 beschriebenen Modellgebäude in Südausrichtung unter Berücksichtigung der Verschattung (vgl. Kapitel 5.2.4) dargestellt.

Solarthermie und Blockheizkraftwerk

Die Referenzvariante der Modellgebäude wurde bereits unter Verwendung dieser Anlagentechnik dargestellt. Die Anlagentechnik wird so ausgelegt, dass die solarthermische Anlage 60 % der jährlich benötigten Wärme für die Warmwasserbereitung in hocheffizienten CPC-Kollektoren erzeugt, ein wärmegeführtes und mit Biomethan betriebenes Blockheizkraftwerk erzeugt zu 100 % die darüber hinaus benötigte Wärme im Brennwertbetrieb. Die nach Installation der solarthermischen Anlage noch zur Verfügung stehende Dachfläche wird mit Photovoltaik in Ost-/West-Ausrichtung mit 15° Neigung zur elektrischen Energieerzeugung genutzt. Mit steigender Gebäudegröße und damit steigendem Warmwasserbedarf, nimmt auch die Größe der solarthermischen Anlage zu. Da die Dachfläche der Modellgebäude mit zunehmender Geschosszahl gleich bleibt, sinkt damit die für Photovoltaik zur Verfügung stehende Dachfläche mit steigender Gebäudegröße. Weitere Stromerzeugung erfolgt durch die Photovoltaikanlage an der Fassade und das BHKW. Dieses Anlagentechnik-Konzept wurde im ersten Teilbericht im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung der Planungsphase des Projektes Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main bereits detailliert untersucht und dargestellt und konnte am konkreten Bauvorhaben in der Cordierstraße in die Praxis umgesetzt werden.

Das BHKW arbeitet bei diesem Anlagentechnik-Konzept nachrangig zur solarthermischen Anlage und geht nur in Betrieb, wenn die solarthermische Anlage nicht genügend Wärme produziert, um den aktuellen

Wärmebedarf zu decken. Das BHKW ist in diesem Fall nicht auf möglichst viele Betriebsstunden ausgelegt, sondern darauf, die wertvolle Ressource Biomasse nur dann einzusetzen, wenn nicht genügend solare Energie zur Verfügung steht. Dies ist aus Sicht des Ressourcenschutzes und zur Einhaltung des begrenzten Biomassepotenzials in Deutschland von 35 kWh/(m²a) (vgl. [Diefenbach 2002]) geboten. Zusätzlich ergibt sich durch diese Kombination dieser Anlagentechniken der Vorteil, dass das BHKW, da es nur zu Zeiten geringer solarer Einstrahlung in Betrieb geht, sich auch mit den Photovoltaik-Anlagen auf dem Dach und an der Fassade zur Stromproduktion optimal ergänzt. Dadurch ist die elektrische Energieerzeugung des Gebäudes bei den Modellgebäuden sehr viel ausgeglichener, als bei Anlagentechnik-Konzepten, die zur elektrischen Energieerzeugung ausschließlich auf Photovoltaik setzen. Das elektrische Netz wird deutlich weniger als „saisonaler“ Speicher für elektrische Energie genutzt, um den Strombedarf des Gebäudes decken zu können.

Die in Bild 67 und Tabelle 22 dargestellten Energiekennwerte der vier Modellgebäude mit der hier beschriebenen Anlagentechnik zeigen, dass der Energiegewinn des Gebäudes in Form des Primärenergieüberschusses mit zunehmender Gebäudegröße immer geringer wird. Ein größeres, bzw. höheres Gebäude als das Modellgebäude 4 mit 7 Stockwerken, kann mit der hier dargestellten Anlagentechnik keinen Energieüberschuss mehr erzielen.

Tabelle 22: Ergebnisse der Modellgebäude für eine Wärmeversorgung mit Solarthermie und BHKW, Referenzvariante verschattet

		Gebäude 1	Gebäude 2	Gebäude 3	Gebäude 4
Nutzenergiebedarf (Wärme & el. Energie)	kWh/(m²a)	57,6	53,4	53,1	52,9
Stromerzeugung gesamt	kWh/(m²a)	74,2	41,3	35,3	28,3
Biomasse Bezug	kWh/(m²a)	**36,0**	31,1	30,8	30,8
Strombilanz Überschuss - / Bezug +	kWh/(m²a)	-55,2	-22,6	-16,7	-9,7
Primärenergie Überschuss - / Bezug +	kWh/(m²a)	-85,2	-27,4	-16,7	-4,1
CO2 negativ - / Ausstoß +	kg/(m²a)	-19,6	-4,2	-1,3	**2,2**

Wärmepumpen

Die aktuell bestehenden Gebäude mit Energiegewinn, bisher häufig als Einfamilienhäuser oder kleine Mehrfamilienhäuser realisiert, nutzen zur Wärmeerzeugung meist als einzigen Wärmeerzeuger Wärmepumpen. Es kommen unterschiedliche Arten von Wärmepumpen zum Einsatz: Außenluft-Wärmepumpen, teilweise aber auch Grundwasser- oder Erdreich-Wärmepumpen. Wesentlicher Unterschied dieser Techniken besteht in den erzielbaren Jahresarbeitszahlen, die sich hauptsächlich aufgrund der nutzbaren Temperaturdifferenz zwischen Wärmequellen und Wärmeabnahme ergibt (vgl. Kapitel 4.1.1). Für eine erste Betrachtung dieser Anlagentechnik zum Einsatz in den Modellgebäuden wird eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3,5 angenommen. Dies entspricht einer guten Erdreich-Wärmepumpe für den Fall, dass im Gebäude niedrige Systemtemperaturen für Heizung und Warmwasser realisiert werden können. Diese Anlagentechnik wird auf Seite der Stromerzeugung durch die Nutzung einer Photovoltaikanlage auf dem gesamten Dach und an der nach Süden ausgerichteten Fassade ergänzt. Bild 68 zeigt die Energiebilanz des Modellgebäudes mit dieser Anlagentechnik. Die sich ergebenden Überschüsse für alle Modellgebäude sind in Bild 69 dargestellt.

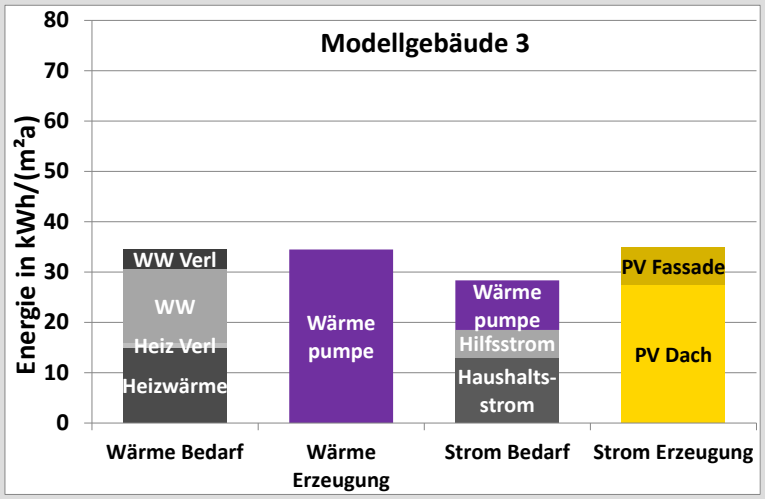


Bild 68: **Energiebilanz des Modellgebäudes 3 mit der Anlagentechnik Wärmepumpe (JAZ=3,5) + Photovoltaik**

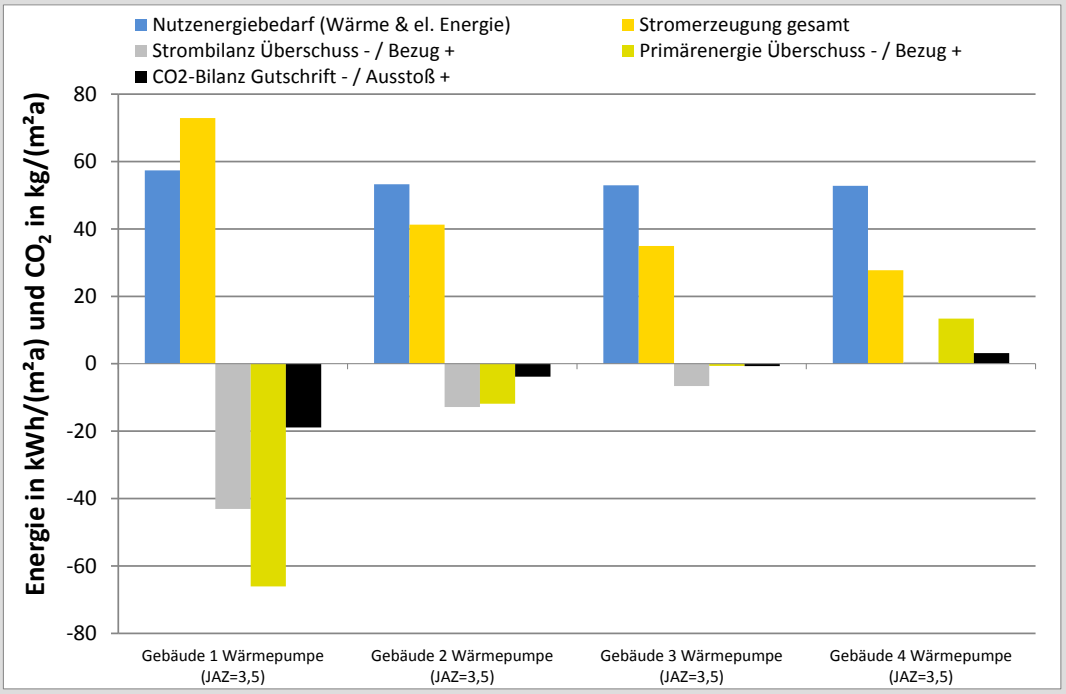


Bild 69: **Überschuss bzw. Bezug der vier Modellgebäude mit einer Wärmepumpe (JAZ=3,5) und Photovoltaik**

Gebäude 1-4	Dach	Verschattung		Anlagen-technik	Ausrich-tung	Standort	Innen-temp.	WWver-brauch
		Dach	Fassade					
Referenz	Flach-dach	15° Horizont	20° Horizont	Wärme-pumpe	Süd	Frankfurt am Main	20 °C	33 l bei 48 °C

Die Energiekennwerte in Bild 69 zeigen, dass nicht bei allen Modellgebäuden mit einer Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3,5 ein Energiegewinn erzielt werden kann. Generell zeigt sich auch hier wieder der Zusammenhang, dass es mit zunehmender Gebäudegröße, aufgrund der begrenzten Flächen zur solaren Energieerzeugung, schwieriger wird, einen Energiegewinn zu erreichen. Analog zu der bisher dargestellten Anlagentechnik Solarthermie und BHKW ist auch bei dem Einsatz von Wärmepumpen eine sehr hohe Energieeffizienz des Gebäudes essentiell, um einen Energiegewinn erzielen zu können.

In Bild 69 wird deutlich, dass trotz der hohen Energieeffizienz des Gebäudes nur ein geringer Primärenergieüberschuss erzielt werden kann. Mit zunehmender Gebäudegröße müssen daher auch effizientere Wärmepumpen mit Jahresarbeitszahlen von 4 und höher eingesetzt werden. Nur dann können große Mehrfamilienhäuser mit dieser Technik einen Energiegewinn erzielen. Bild 70 zeigt exemplarisch für das Modellgebäude 3 die Ergebnisse des Einsatzes von Wärmepumpen mit unterschiedlichen Jahresarbeitszahlen. Der Nutzenergiebedarf und die Stromerzeugung des Gebäudes bleiben gleich, es verändern sich durch die unterschiedlichen Jahresarbeitszahlen lediglich die Energiekennwerte der Strombilanz, der Primärenergie und des CO_2-Äquivalents.

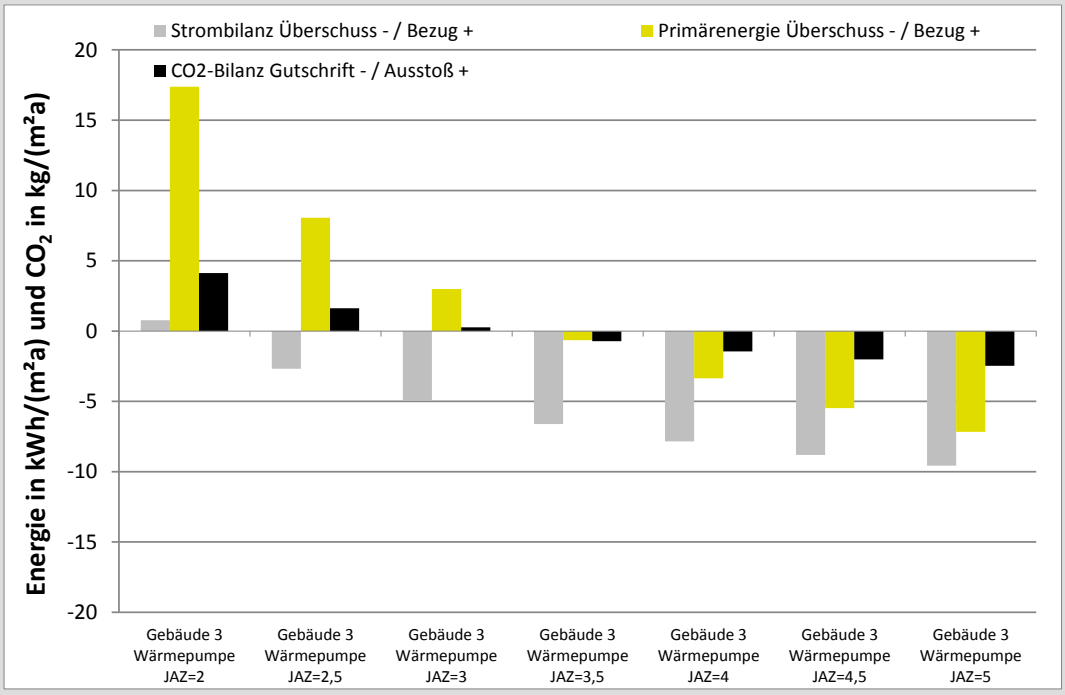


Bild 70: Einfluss unterschiedlicher Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe bei Modellgebäude 3

Bei geringeren Jahresarbeitszahlen verbraucht die Wärmepumpe mehr elektrische Energie zur Erzeugung der benötigten Wärme, während die Energieerzeugung durch Photovoltaik gleich bleibt. Dadurch steht weniger Strom-Überschuss zur Einspeisung ins Netz und damit zur Gutschrift zur Verfügung. Während bereits bei der Variante mit einer Wärmepumpe mit der Jahresarbeitszahl 2,5 eine geringe Menge Energie in der Jahresbilanz in das elektrische Netz eingespeist werden kann, ergibt sich bei dieser Variante aufgrund des Primärenergiebedarfs der Photovoltaik, der kompensiert werden muss, noch kein Primärenergieüberschuss. Ähnlich verhält es sich mit dem Kennwert der THG-Emissionen (CO_2-Äquivalent). Ein Primärenergieüberschuss kann erst ab einer Jahresarbeitszahl von 3,5 erreicht werden.

Solarthermie und Wärmepumpe

Durch eine zusätzliche Nutzung von Solarthermie in Kombination mit einer Wärmepumpe verschlechtern sich hier die Energiekennwerte. Ursache ist, dass die Solarthermie nach Süden orientiert auf dem Dach platziert ist. Aufgrund des benötigten Verschattungsabstandes ist die „Flächeneffizienz“ des Daches in diesem Fall schlechter als bei Ost-/West aufgeständerter Photovoltaik. D. h. unter diesen Annahmen fehlt die durch die Solarthermie verdrängte PV für die Primärenergiegutschrift, es kann kein Überschuss mehr erzielt werden. Im Teilbericht über die Planungsphase der Cordierstraße 4 war zum Zeitpunkt der Betrachtung der Anlagentechnik Solarthermie und Wärmepumpe aufgrund des höheren Kosten/Nutzen-Verhältnisses auch für die Photovoltaik (analog der Solarthermie) noch eine Südaufstellung mit den benötigten Verschattungsabständen zwischen den Kollektorreihen geplant. In diesem Fall waren durch Photovoltaik und Solarthermie ähnliche Ergebnisse zu erzielen.

5.2.6 Gebäudeausrichtung

Bestehende Gebäude mit Energieüberschuss sind meist nach Süden ausgerichtet, um auf diese Weise größtmögliche Erträge aus der solaren Einstrahlung erzielen zu können. Die Ausrichtung des Gebäudes hat wesentlichen Einfluss auf den Heizwärmebedarf und, abhängig von der Dachform, auch auf den Photovoltaikertrag (vgl. Kapitel 5.2.2). Innerhalb bestehender Stadtgebiete ist die Ausrichtung eines Gebäudes meist nicht frei wählbar. Daher soll an dieser Stelle untersucht werden, wie sich die Ausrichtung des Gebäudes auf seine Energiebilanz auswirkt.

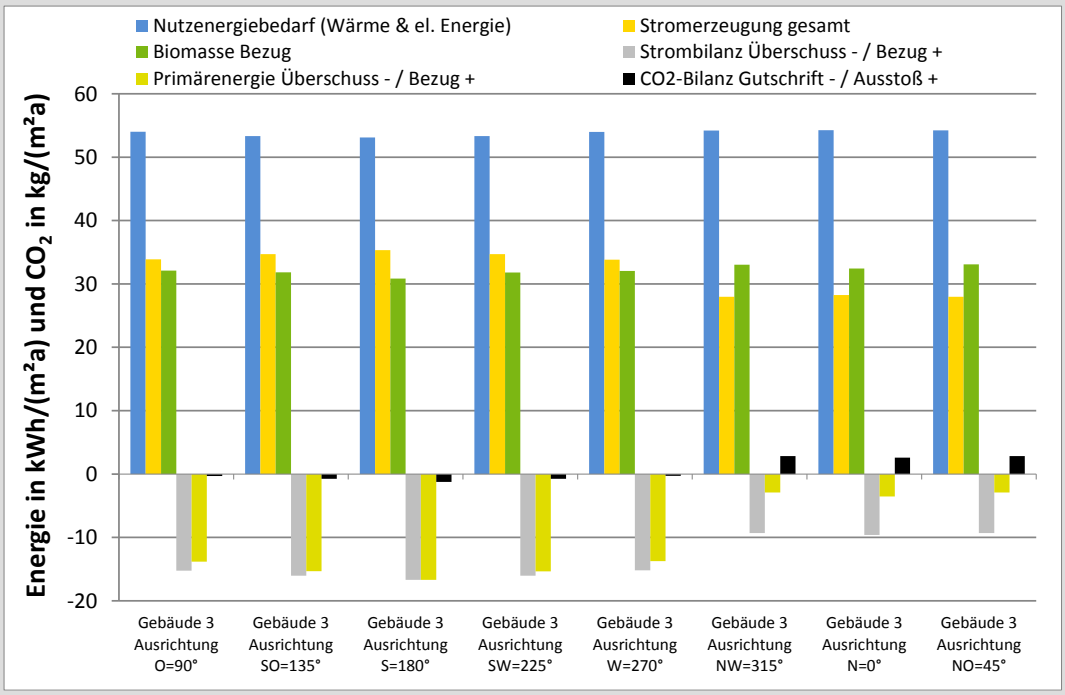


Bild 71: Überschuss bzw. Bezug des Modellgebäudes 3 bei unterschiedlicher Orientierung der Hauptfassade

Gebäude 1-4	Dach	Verschattung		Anlagen-technik	Ausrich-tung	Standort	Innen-temp.	WWver-brauch
		Dach	Fassade					
Referenz	Flach-dach	15° Horizont	20° Horizont	ST & BHKW	variiert	Frankfurt am Main	20 °C	33 l bei 48 °C

Die Betrachtung findet unter der Annahme statt, dass die bisher nach Süden ausgerichtete Hauptfassade mit großen Fensterfronten und Photovoltaik-Fassade in verschiedene Himmelsrichtungen gedreht wird. Die Ausrichtung der Photovoltaik-Fassade entspricht daher der Gebäudeausrichtung. Da eine nach Norden ausgerichtete Photovoltaik-Fassade nur extrem geringe Erträge erwirtschaftet, erscheint dies nicht zielführend, und es wird bei Nordausrichtung keine Photovoltaik an der Fassade berücksichtigt. Eine Nord-Ausrichtung des Gebäudes kann in städtischer Lage denkbar sein, wenn z. B. die Südseite durch andere Gebäude verschattet wird oder eine Nord-Ausrichtung aufgrund der Aussicht gewünscht ist. [Peper et al. 2004] zeigen, dass auch ein nach Norden ausgerichtetes Passivhaus die Zielwerte erreichen kann. Für die hier durchgeführte Betrachtung ist die Photovoltaikanlage auf dem Flachdach, wie auch bei dem Referenzgebäude, in Ost-/West-Richtung mit 15 ° Neigung aufgeständert. Bei Änderung der Ausrichtung des Gebäudes wird angenommen, dass sie trotzdem Ost-/West-ausgerichtet installiert wird. Aufgrund der Gebäudegeometrie ergibt es sich, dass in allen Ausrichtungen die gleiche Anzahl an Photovoltaik-Modulen auf dem Dach installiert werden können und der Photovoltaik-Ertrag der Dachanlage daher bei allen Ausrichtungen in ähnlicher Höhe erzielt werden kann. Bild 71 zeigt die Energiekennwerte, die sich für verschiedene Gebäudeausrichtungen exemplarisch bei Modellgebäude 3 ergeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ausrichtung einen Einfluss auf die Energiekennwerte des Gebäudes besitzt, dieser jedoch im Bereich einer Ausrichtung nach Ost über Süd bis West nur gering ist. Der im Nutzenergiebedarf enthaltene Heizwärmebedarf steigt bei Abweichung von der Südausrichtung leicht an, da geringere solare Wärmegewinne erzielt werden können. Der Photovoltaikertrag der Dach-Anlage bleibt bei allen Ausrichtungen gleich. Der Ertrag der Photovoltaik-Fassade fällt bei Ost- und West-Ausrichtung deutlich geringer aus, bei Nord-Ausrichtung entfällt er. Dies hat entsprechende Auswirkungen auf den Primärenergieüberschuss und die CO_2-Gutschrift, die bei Ost- und Westausrichtung des Gebäudes leicht geringer ausfallen. Bei Nord-Ausrichtung ist nahezu kein Primärenergieüberschuss mehr vorhanden und das Gebäude ist nicht mehr klimaneutral. Ursache ist hier jedoch hauptsächlich die fehlende Photovoltaik-Fassade.

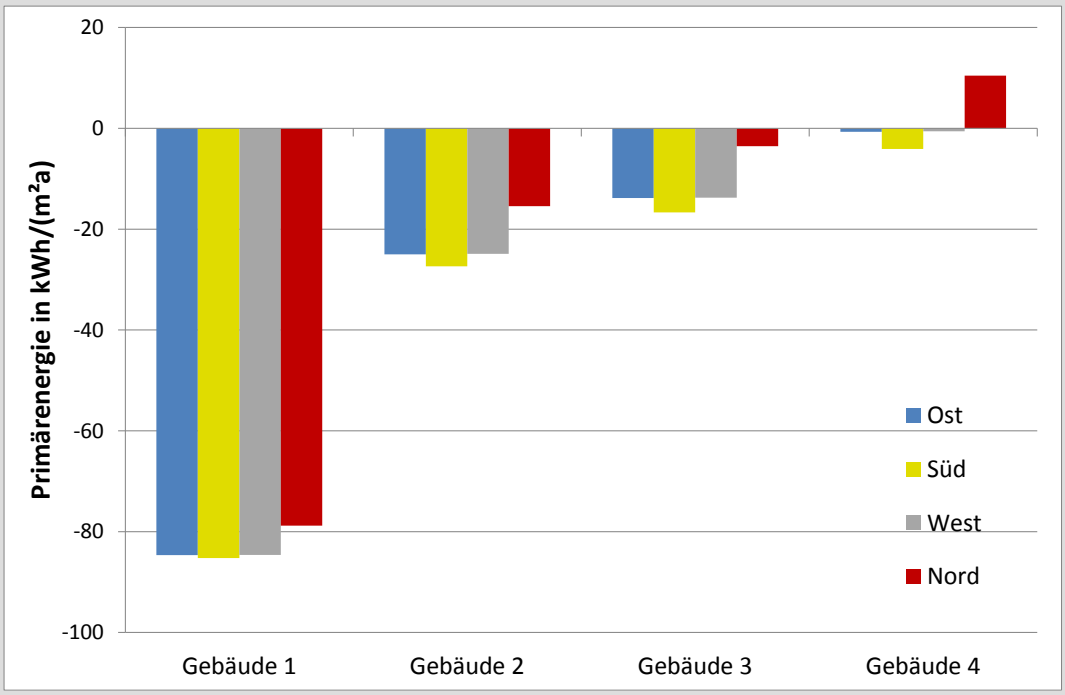


Bild 72: Primärenergiebedarf der vier Modellgebäude bei unterschiedlicher Ausrichtung

In Bild 72 sind die Primärenergiekennwerte aller Modellgebäude bei unterschiedlichen Ausrichtungen dargestellt. Insgesamt zeigt sich, dass die Ausrichtung auf die Erreichung des Energiegewinns nur einen geringen Einfluss hat. Mit zunehmender Gebäudegröße bzw. im Verhältnis zur Wohnfläche kleiner werdender Fläche zur solaren Energieerzeugung, kann aber auch die Ausrichtung den entscheidenden Beitrag für die Erreichung des Energiegewinns liefern. Entscheidend ist hier, dass zusätzlich zur Dachfläche eine geeignete Fassadenfläche für die solare Energieerzeugung vorhanden ist.

Wesentlicher Grund für die geringe Abhängigkeit der Ergebnisse von der Gebäudeausrichtung ist die Ausführung der Photovoltaik-Anlage auf dem Flachdach in Ost-/West-Ausrichtung, die nahezu unabhängig von der Gebäudeausrichtung gleichbleibende Erträge liefert. Insgesamt lässt sich schließen, dass sich das Konzept der hier gewählten Modellgebäude des Passivhauses mit Energiegewinn für die Umsetzung an vielen verschiedenen Standorten, auch in innerstädtischen Lagen, eignet.

5.2.7 Standort und klimatische Bedingungen

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Energiebilanz des PH+E sind die Außentemperatur in den Wintermonaten und die Solarstrahlung. Diese wirken sich auf den Wärmebedarf des Gebäudes und auf die solare Energieerzeugung aus. Die bisherigen Betrachtungen wurden für Hessen für den Standort Frankfurt am Main dargestellt. Dieser Standort verfügt bei Betrachtung der Globalstrahlung über mittlere bis gute Bedingungen für Deutschland und hat im Winterhalbjahr ein eher mildes Klima (vgl. Bild 73).

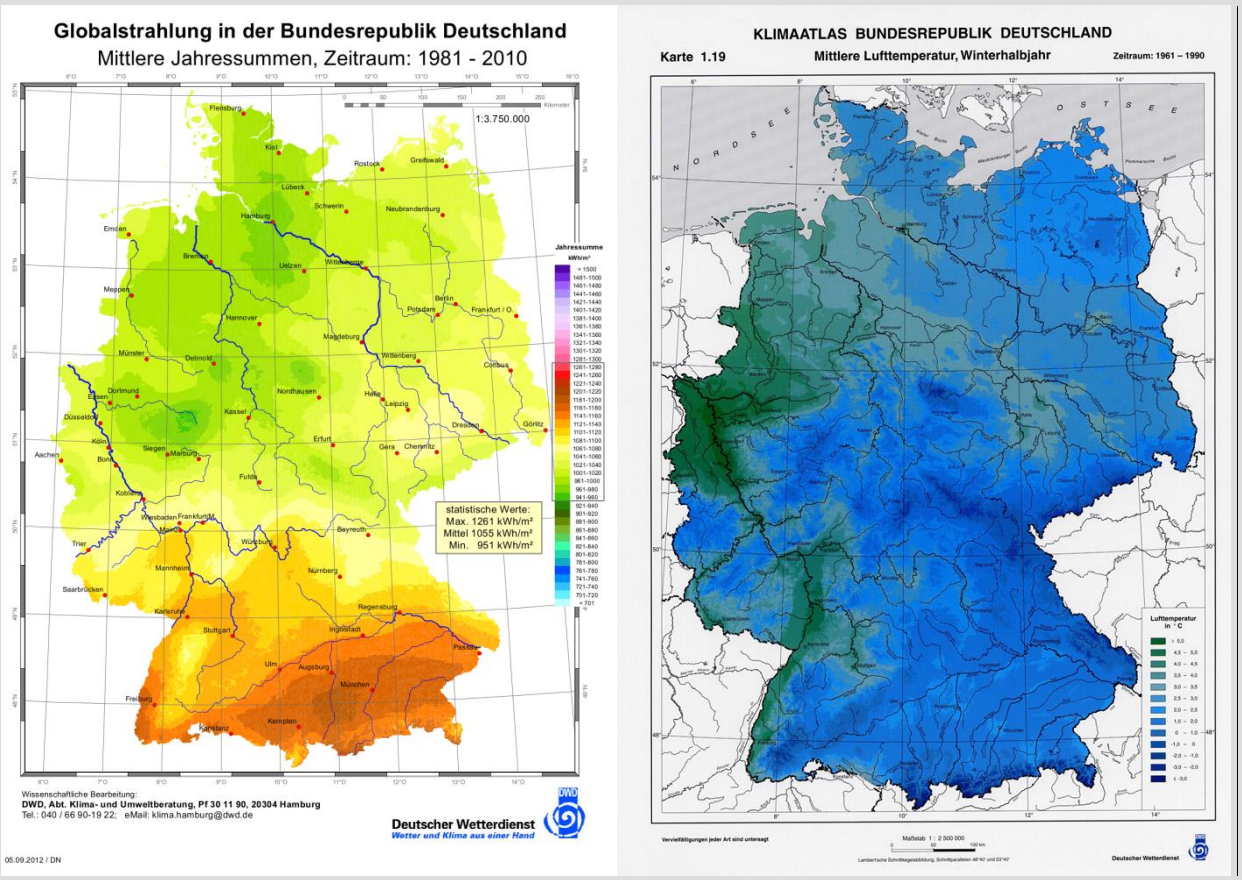


Bild 73: Jährliche Globalstrahlung und mittlere Lufttemperatur im Winterhalbjahr in Deutschland

Quelle: www.dwd.de

Als Vergleichsorte zum bisher betrachteten Standort Frankfurt am Main wurden die Standorte München, Freiburg und Kiel gewählt, um damit ein großes Spektrum an klimatischen Randbedingungen für Deutschland zu betrachten. In Tabelle 23 sind die an den verschiedenen Standorten vorherrschenden Randbedingungen aufgelistet: die mittlere Lufttemperatur im Winterhalbjahr, die Globalstrahlung, die Heizgradtage und Gradtagszahlen sowie die sich an den Standorten ergebenden Photovoltaikerträge.

Tabelle 23: Klimadaten der Vergleichsstandorte

	Frankfurt	München	Freiburg	Kiel
Mittlere Lufttemperatur im Winterhalbjahr	4,0-4,5 °C	2-2,5 °C	4,5-5 °C	2,5-3 °C
Globalstrahlung	1081-1100 kWh/(m²a)	1161-1180 kWh/(m²a)	1121-1140 kWh/(m²a)	961-980 kWh/(m²a)
Heizgradtage H_T	214 d/a	224 d/a	195 d/a	227 d/a
Gradtagszahl G_t	79 kKh/a	92 kKh/a	70 kKh/a	85 kKh/a
Photovoltaikertrag Dachanlage pro kW_P*	829 kWh/kWp	929 kWh/kWp	889 kWh/kWp	770 kWh/kWp
Photovoltaikertrag Südfassade pro kW_P**	579 kWh/kWp	677 kWh/kWp	633 kWh/kWp	564 kWh/kWp

*Simulationsergebnisse für hocheffiziente Module mit Wirkungsgrad ca. 20 %, Neigung 15 °, Mittelwert Ost-/West-ausgerichteter Module mit Verschattung 15 ° (vgl. Kapitel 5.2.4)

**Simulationsergebnisse für Fassaden-Module mit Wirkungsgrad ca. 11 %, Südausrichtung, mit Verschattung 20 °

Bild 74 zeigt die Ergebnisse für Modellgebäude 3 an den unterschiedlichen Standorten. Dabei wird der Einfluss des Klimas auf den Heizwärmebedarf (hier im Nutzenergiebedarf enthalten) sehr gut ersichtlich.

Im Vergleich zu Frankfurt ist der Wärmebedarf in München und Kiel aufgrund der geringeren winterlichen Temperaturen erhöht. Für den Standort Kiel wirkt sich dies direkt negativ auf den Energiegewinn des PH+E aus. In München erzielt das Gebäude trotz des höheren Heizwärmebedarfs einen höheren Energiegewinn als das Gebäude in Frankfurt. Ursache ist hier die hohe solare Einstrahlung und die dadurch deutlich höheren Photovoltaikerträge. Das Gebäude in Freiburg ist dem mildesten Klima ausgesetzt, da die Solarstrahlung jedoch nicht so hoch ist wie in München, erreicht es nicht ganz den dort möglichen Energiegewinn.

Insgesamt lässt sich daher festhalten, dass der Energieüberschuss des Passivhauses mit Energiegewinn bei der Betrachtung unterschiedlicher Standorte hauptsächlich von der solaren Einstrahlung abhängig ist. Der durch die klimatischen Randbedingungen unterschiedliche Heizwärmebedarf hat auch einen Einfluss auf den Energiegewinn des Gebäudes, dieser ist jedoch geringer als der Einfluss der Solarstrahlung auf den Energiegewinn. Ursache des geringen Einflusses der klimatischen Randbedingungen ist die hohe Energieeffizienz des Gebäudes durch die Passivhausbauweise. Bei schlechterem energetischem Standard wären die Auswirkungen der klimatischen Bedingungen größer und es wäre schwieriger an kühleren Standorten Gebäude mit Energiegewinn zu errichten.

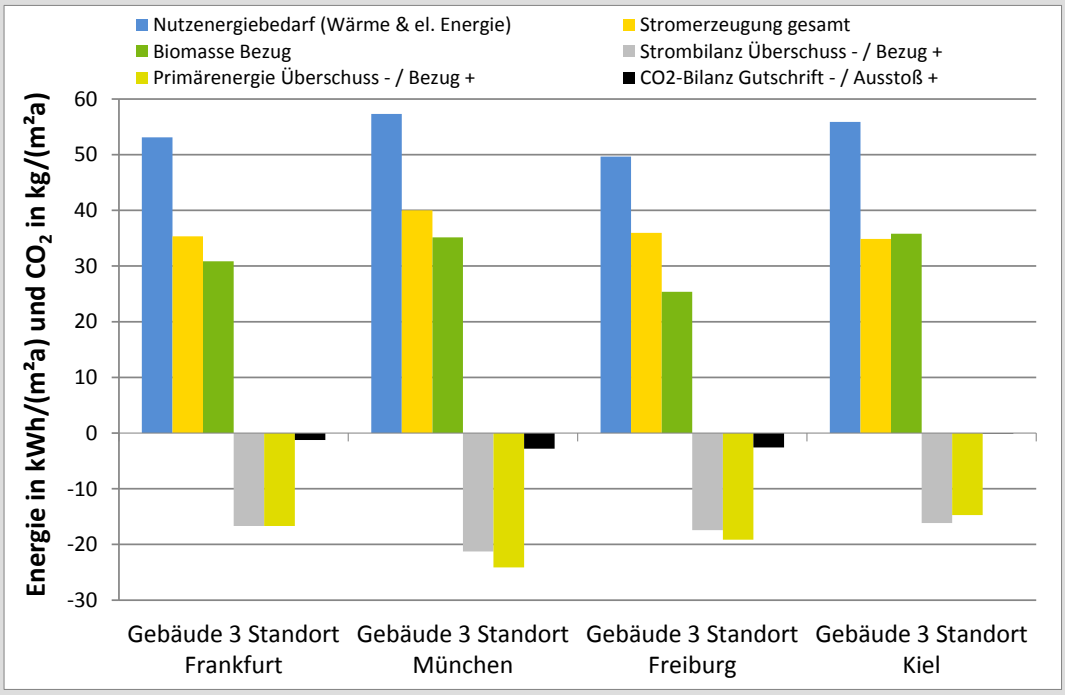


Bild 74: Auswirkungen unterschiedlicher Standorte bei Modellgebäude 3

Gebäude 1-4	Dach	Verschattung		Anlagen-technik	Ausrich-tung	Standort	Innen-temp.	WWver-brauch
		Dach	Fassade					
Referenz	Flach-dach	15° Horizont	20° Horizont	ST & BHKW	Süd	variiert	20 °C	33 l bei 48 °C

5.2.8 Einfluss veränderten Nutzerverhaltens

Das Nutzerverhalten hat auch beim Passivhaus mit Energiegewinn einen deutlichen Einfluss auf die Energiekennwerte[16]. Heizen die Nutzer ihre Wohnung auf höhere Raumtemperaturen oder verbrauchen Sie mehr Warmwasser als in der Bilanzierung angesetzt, dann hat dies direkte Auswirkungen auf den Nutzenergiebedarf des Gebäudes. Dieser Zusammenhang wird in diesem Kapitel exemplarisch für Modellgebäude 3 für die Anlagentechniken Solarthermie und BHKW sowie Wärmepumpe mit Photovoltaik betrachtet.

Erhöhte Raumtemperaturen sowie ein erhöhter Warmwasserbedarf haben eine direkte Auswirkung auf den Nutzwärmebedarf des Gebäudes. Oft ergeben sich in Gebäuden mit sehr gut ausgeführter thermischer Hülle höhere Raumtemperaturen als für die Bilanz angenommen werden. Für die bisherigen Berechnungen dieses Kapitels wurde eine Standard-Raumtemperatur von 20 °C berücksichtigt. Höhere Raumtemperaturen ergeben sich aufgrund gestiegener Komfortansprüche der Nutzer und aufgrund des Sachverhaltes, dass durch die gute Dämmung der Gebäude diese weniger Wärme verlieren und eine Nachtabsenkung daher nicht mehr umgesetzt wird. Bei wissenschaftlich untersuchten Passivhäusern werden Raumtemperaturen von 21 °C - 23 °C gemessen (vgl. [Großklos et al. 2013a]). Dies, sowie ein gestiegener Warmwasserver-

[16] Der Einfluss ist relativ zum Bedarfswert u. U. hoch, absolut betrachtet liegt er im einstelligen Kilowattstunden-Bereich und somit niedriger als bei Gebäuden mit schlechterem energetischem Standard.

brauch über die projektierten 25 l/(Pers*d) hinaus, ist in Bild 75 für die Anlagentechnik Solarthermie und BHKW dargestellt.

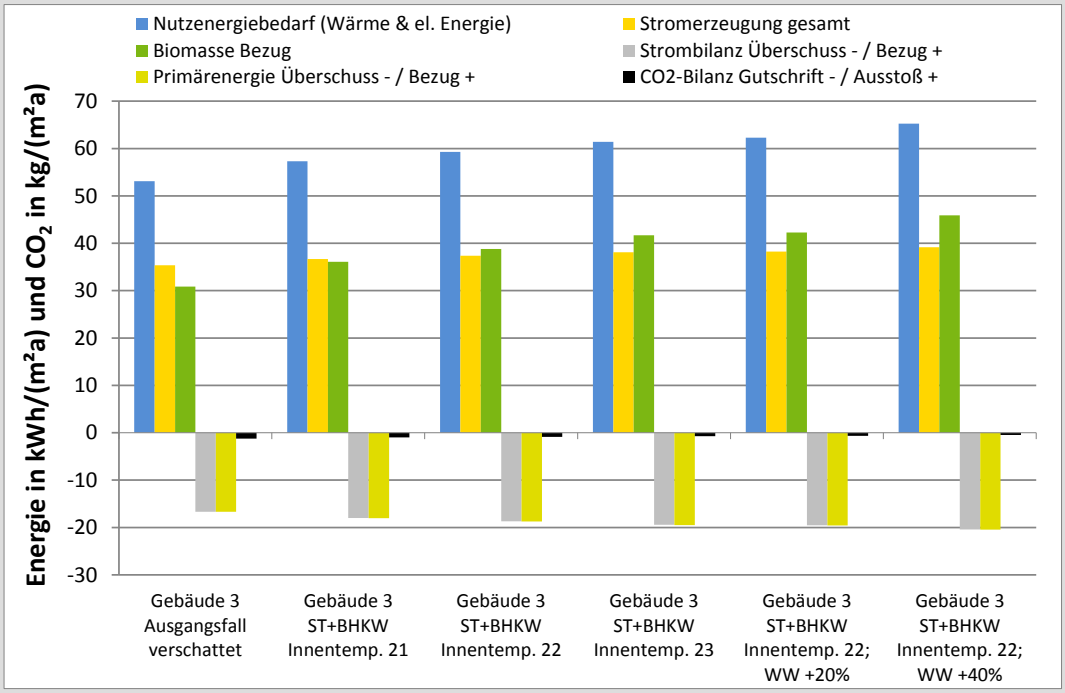


Bild 75: Ergebnisse für Modellgebäude 3 mit der Anlagentechnik Solarthermie und BHKW bei Variation der Innentemperatur und des Warmwasserbedarfs

Gebäude 1-4	Dach	Verschattung		Anlagen-technik	Ausrich-tung	Standort	Innen-temp.	WWver-brauch
		Dach	Fassade					
Referenz	Flach-dach	15° Horizont	20° Horizont	ST & BHKW	Süd	Frankfurt am Main	variiert	variiert

Durch die erhöhten Raumtemperaturen und den erhöhten Warmwasserverbrauch steigt der Nutzwärmebedarf, in der Darstellung im Nutzenergiebedarf (blau) enthalten, an. Folge ist, dass ein geringer Anteil an Wärme durch die solarthermische Anlage gedeckt werden kann, die zusätzlich benötigte Wärme muss daher durch das BHKW gedeckt werden. Der Bedarf an Biomasse steigt entsprechend an, und das Biomasse-Potenzial von 35 kWh/(m²a) wird nicht mehr eingehalten. Gleichzeitig wird durch die längeren Laufzeiten des BHKWs mehr Strom erzeugt. Die Stromeinspeisung in das elektrische Netz sowie der Primärüberschuss aufgrund der Gutschrift, erhöhen sich daher mit steigendem Wärmeverbrauch. Ab einer Innentemperatur von 22 °C benötigt Modellgebäude 3 mehr Biomasse als bei Beachtung des Biomasse-Potenziales dem Gebäude zustehen würde. Dem kann durch die Installation einer größeren solarthermischen Anlage entgegengewirkt werden, wenn die zusätzliche solarthermische Wärme zeitlich so anfällt, dass sie für Warmwasser und Heizung genutzt werden kann. In der Folge würde dadurch die Größe der Photovoltaikanlage und somit die elektrische Energieerzeugung des Gebäudes reduziert. Bei Modellgebäude 3 wäre dies möglich, da auch bei Reduktion der bestehenden Stromeinspeisung das Ziel des Energiegewinns noch erreicht werden könnte.

Ähnlich ungünstige Auswirkungen hat ein höherer Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser auch bei Einsatz einer Wärmepumpe (vgl. Bild 76). Zur Berechnung wurde hier eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3,5 angenommen. Durch den steigenden Wärmebedarf des Gebäudes wird mehr elektrische Energie für die Wärmeerzeugung benötigt, die Einspeisung in das elektrische Netz und damit auch die Primärenergiegutschrift zur Kompensation des Primärenergiebedarfs der Photovoltaikanlage, fällt daher geringer aus. Das Gebäude kann folglich bei Abweichungen von den Standardrandbedingungen keinen Energieüberschuss mehr erzielen.

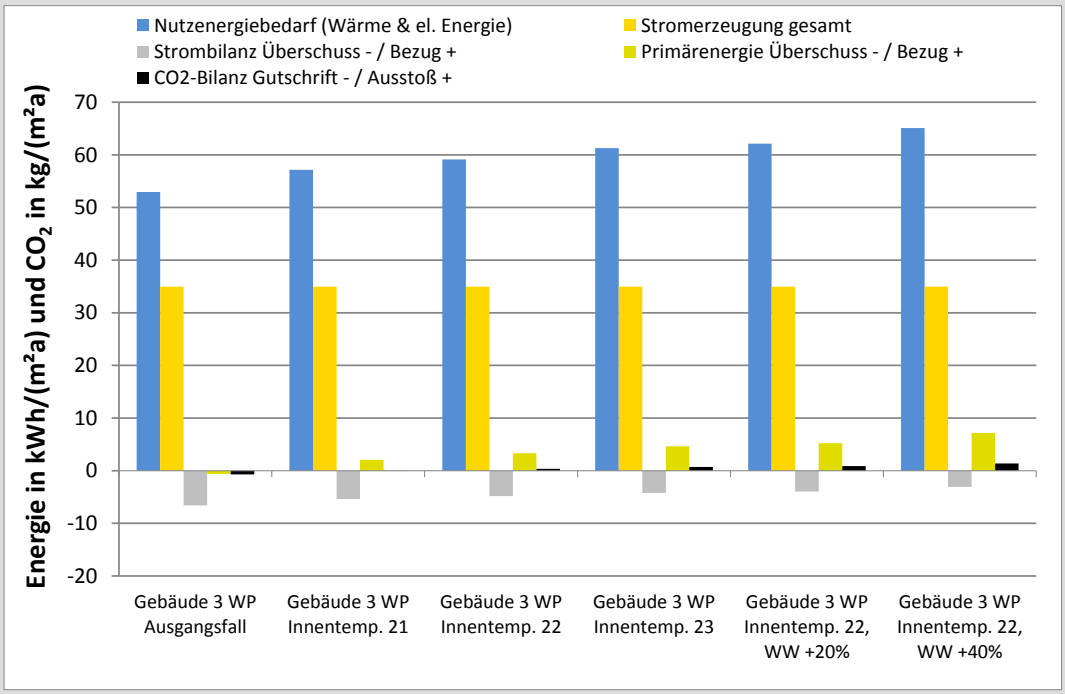


Bild 76: Ergebnisse für Modellgebäude 3 mit der Anlagentechnik Wärmepumpe bei Variation der Innentemperatur und des Warmwasserbedarfs

Gebäude 1-4	Dach	Verschattung		Anlagen-technik	Ausrich-tung	Standort	Innen-temp.	WWver-brauch
		Dach	Fassade					
Referenz	Flach-dach	15° Horizont	20° Horizont	Wärme-pumpe	Süd	Frankfurt am Main	variiert	variiert

Wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes bei Einsatz einer Wärmepumpe hat die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. Durch den Einsatz einer effizienteren Wärmepumpe könnte bei diesem Gebäude auch bei steigendem Wärmebedarf das Ziel des Energieüberschusses noch erreicht werden. In Bild 77 ist die Primärenergiebilanz von Modellgebäude 3, abhängig von Innentemperatur, Warmwasserbedarf und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe dargestellt.

Wird eine effizientere Wärmepumpe genutzt, könnte das Gebäude trotz höherem Wärmebedarf einen Energiegewinn erzielen. Dies ist jedoch nicht in allen Fällen aufgrund der baulichen Gegebenheiten möglich und meist mit erheblichen Kosten verbunden. Meist führt ein erhöhter Heizwärmebedarf auch zu höheren Systemtemperaturen, was eher mit sinkenden Jahresarbeitszahlen verbunden ist.

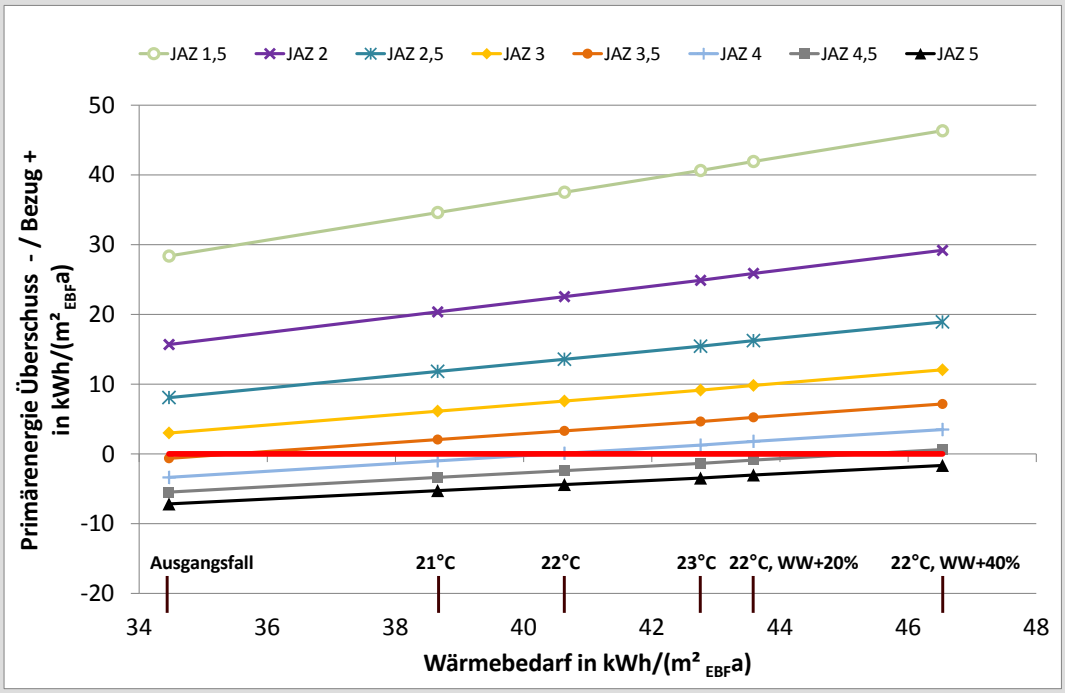


Bild 77: **Modellgebäude 3: Primärenergiebilanz abhängig von Innentemperatur, Warmwasserbedarf und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe**

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zu beiden Anlagentechniken unter Berücksichtigung eines geänderten Nutzerverhaltens zeigen insgesamt, wie wichtig die Motivation der Nutzer zu energiesparendem Verhalten ist. Der erhöhte Energieverbrauch könnte teilweise durch den Einsatz anderer Anlagentechnik kompensiert werden, jedoch auch dies ist nicht unbegrenzt möglich.

5.2.9 Integration des PH+E ins Quartier

Das PH+E ist ein sehr wichtiger Bestandteil für zukünftige Siedlungen, Quartiere oder ganze Städte, die in der Bilanz einen Energiegewinn erzielen möchten. Bei Ausweitung des Bilanzraumes vom einzelnen Haus auf eine größere Anzahl bestehender Gebäude entstehen dabei gleich mehrere Vorteile: Gebäude mit günstigen Randbedingungen können solche mit weniger günstigen Randbedingungen kompensieren. Die für den Energiegewinn benötigte hohe Energieeffizienz und Energieerzeugung kann an und in den Gebäuden stattfinden, die hierzu die kostengünstigsten Rahmenbedingungen bieten und es können zusätzliche, räumlich zur Verfügung stehenden Flächen zur Energieerzeugung genutzt werden.

Die Parameterstudie hat gezeigt, dass es insbesondere bei kleinen Gebäuden möglich ist große Energiegewinne zu erwirtschaften. Diese können den Energiebedarf anderer Gebäude, die durch eine Sanierung aufgrund spezifischer Randbedingungen (z. B. Denkmalschutz) nicht selbst das Niveau des PH+E erreichen können, kompensieren. Hierzu muss jedoch der Anreiz bestehen, hohe Energieüberschüsse auch tatsächlich am Gebäude zu realisieren. Ursachen, dass diese theoretisch möglichen hohen Energiegewinne zur Zeit häufig nicht realisiert werden, sind zum einen der fehlende Anreiz aufgrund der bestehenden Bilanzgrenze des Einzelgebäudes (es reicht aus, einen Energiegewinn zu erzielen, die Höhe ist bisher nicht entscheidend). Zum anderen wird eine besonders hohe Energieeffizienz und Energieerzeugung am Gebäude aufgrund der zusätzlichen Kosten bei bereits erreichtem Ziel des Energiegewinns nicht umgesetzt. Die Gebäudeeigentü-

mer potenzieller Passivhäuser mit Energiegewinn brauchen daher zusätzlichen Anreiz, vermutlich monetärer Art, um möglichst hohe Energiegewinne an ihrem Gebäude zu realisieren. Abhängig von der Art und Ausgestaltung dieses Anreizes wäre es möglich auch gleich den zweiten Vorteil zu unterstützen, dass die Energieeffizienz und Energieerzeugung an oder in den Gebäuden durchgeführt wird, bei denen sie zu den geringsten Kosten führt.

Das mittelfristige Gesamtziel ist die Ausweitung der Bilanzgrenzen vom einzelnen Gebäude zum Quartier oder ganzen Städten und die Deckung des gesamten Energiebedarfs durch regenerative Energien. Vor diesem Hintergrund sollte bedacht werden, dass jede nicht umgesetzte Maßnahme zur Energieeffizienz und Energieerzeugung die Erreichung dieses Gesamtzieles erschwert. Daher ist es in diesem Kontext so wichtig, beim Einzelgebäude als PH+E zu beginnen, um schließlich zusammen mit allen anderen Maßnahmen der Energieeffizienz und -erzeugung, auch außerhalb des Gebäudebereichs, das Gesamtziel der vollständig regenerativen Energieerzeugung erreichen zu können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Bericht beschreibt das Passivhaus mit Energiegewinn (PH+E) als Konzept für Gebäude mit Energieüberschuss in der Jahresbilanz. Hintergrund sind unter anderem die Vorgaben der EU im Rahmen der EU-Gebäuderichtinie, die bis zum Jahr 2021 für Neubauten einem Energiebedarf von nahe Null und überwiegend regenerative Restenergieversorgung vorsehen. Die Passivhäuser mit Energiegewinn gehen über diese Anforderungen noch deutlich hinaus und stellen ein Konzept dar, wie Gebäude, vor allem auch größere Mehrfamilienhäuser, in der Jahresbilanz einen Ausgleich unter Berücksichtigung von Heizung, Warmwasser und dem gesamten Elektroenergieverbrauch erreichen können. Sie bilden damit eine wichtige Basis für einen zukünftigen, klimaneutralen Wohnungsbau in Deutschland.

Der Bericht stellt in Kapitel 2.1 unterschiedliche Definitionen für innovative Gebäude mit bilanziellem Energieüberschuss vor und diskutiert in Kapitel 2.2 sinnvolle Ansätze der Bilanzgrößen, Bilanzgrenzen, Netzkopplung, Biomasseeinsatz und einzuhaltende Mindeststandards. Zusammen mit der Darstellung der Bilanzierungswerkzeuge und den anzusetzenden Primärenergie- und Treibhausgas-Emissionsfaktoren werden in Kapitel 2.3 die Anforderungen an Passivhäuser mit Energiegewinn beschrieben.

Die Anforderungen an Passivhäuser mit Energiegewinn können folgendermaßen zusammengefasst werden: Sie nutzen alle verfügbaren Effizienzpotenziale zur Reduktion des Energiebedarfs. Dies geschieht für die Beheizung durch den Passivhausstandard im Neubau oder eine Sanierung mit Passivhauskomponenten im Bestand. Die Wärmeverteilverluste müssen durch eine Dämmung der Leitungen im unbeheizten Bereich mit dem doppelten der Anforderungen der EnEV 2009 minimiert werden. Außerdem müssen Speicherverluste reduziert werden, falls Speicher erforderlich sind. Mit Effizienzsteigerungen bei der Warmwasserbereitung und der Ausstattung der Wohnungen mit effizienter Beleuchtung und Haushaltsgeräten der Effizienzklassen A++ oder besser wird das Effizienzkonzept abgerundet. Die Bilanzierung erfolgt mit dem PHPP unter Betrachtung der elektrischen Energiebilanz, der Primärenergie sowie der Treibhausgas-Emissionen. Es muss ein bilanzieller Primärenergieüberschuss und mindestens eine ausgeglichene Treibhausgas-Bilanz erreicht werden. Bilanzgrenze ist die Grundstücksgrenze, der Import von regenerativen Energieträgern im Rahmen des Biomassebudgets ist möglich. Es können nur regenerative Energieträger eingesetzt werden. Bilanziert wird über einen Zeitraum von einem Jahr.

In Kapitel 3 werden die Schritte zur Reduktion des Energiebedarfs des Gebäudes für die Bereiche Heizung, Warmwasserbereitung, Hilfsenergie, Haushaltsstrom erläutert und Ansätze zur Motivation der Nutzer vorgestellt. Kapitel 3 beschreibt anschließend die Möglichkeiten der regenerativen Deckung des Energiebedarfs auf der Wärme- und Stromseite. Dabei werden Hinweise zur Auslegung der Anlagen, der Stand der Technik und neue Entwicklung wie Innovationen bei Wärmepumpen oder Brennstoffzellen als Kraft-Wärme-Kopplung beschrieben. Das Kapitel verdeutlicht die vielfältigen Möglichkeiten der Energieproduktion am Gebäude.

Einen zentralen Bestandteil der vorliegenden Untersuchung stellen umfangreiche Parameteruntersuchungen anhand von Modellgebäuden als Passivhaus mit Energiegewinn dar. Es wurden vier verschiedene Mehrfamilienhäuser mit 2, 4, 5 und 7 Stockwerken detailliert mit dem PHPP abgebildet, variiert und die Auswirkungen auf die Energiebilanz eines Passivhauses mit Energiegewinn analysiert. Die Ergebnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Die Energieeffizienz der Gebäude hat einen sehr großen Einfluss auf die Energiebilanz. Mit zunehmender Gebäudegröße wird die Ausnutzung aller Effizienzpotenziale zur Erreichung eines Energiegewinns immer wichtiger. Dies lässt sich nicht durch Anlagentechnik allein kompensieren.

- Die Optimale Dachform zur größtmöglichen Energieerzeugung aus Photovoltaik ist das nach Süden ausgerichtete Pultdach. Kann dieses gerade in Städten bzw. Bestandsquartieren nicht realisiert werden, können auch mit Ost-/West ausgerichteten Dächern und Flachdächern bei Ost/West-Aufständerung der Photovoltaik zielführende Erträge erwirtschaftet werden.
- Fassaden-Photovoltaik wird mit steigender Gebäudegröße bzw. -höhe immer wichtiger, da weniger Dachfläche zur solaren Energieerzeugung pro m² Wohnfläche zur Verfügung steht, müssen alle für die Energieerzeugung geeigneten Flächen ausgenutzt werden.
- Die Verschattung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Zielerreichung, da weniger solare Energieerzeugung zur Verfügung steht.
- Der Vergleich des Einsatzes der Techniken Solarthermie und Blockheizkraftwerk mit einer Wärmepumpe zeigte, dass beide Konzepte die energetischen Ziele erreichen. Mit zunehmender Gebäudegröße wird Energieüberschuss unabhängig von der Anlagentechnik schwieriger erreichbar. Dies zeigt einmal mehr die Bedeutung der Energieeffizienz des Gebäudes. 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.
- Die Ausrichtung der Gebäude hat bei den Modellgebäuden aufgrund des Flachdachs und Ost-/West-Aufständerung 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. Entscheidend ist, dass zusätzlich zur Dachfläche eine geeignete Fassadenfläche für die solare Energieerzeugung vorhanden ist.
- Es wurde die Umsetzung des Konzepts an vier Standorten mit unterschiedlichem Klima und hoher oder niedriger Solarstrahlung untersucht. Aufgrund der Passivbauweise der Gebäude ist der Einfluss der Außentemperatur am Standort auf den Heizwärmebedarf und somit die Reduktion des Energiegewinns 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 Nutzungsrandbedingungen reagiert und bei erhöhten Raumtemperaturen kein Primärenergieüberschuss mehr erreicht wird. Bei einer Wärmeerzeugung über Solarthermie und BHKW ist die Primärenergiebilanz robust gegenüber veränderten Randbedingungen, jedoch wird bei deutlich erhöhten Temperaturen und vermehrtem Warmwasserverbrauch das Biomassepotenzial überschritten. Dies zeigt, dass auch die Nutzer einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen eines Gebäudekonzepts mit Energieüberschuss beitragen können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das hier vorgestellte Konzept des Passivhauses mit Energiegewinn die Möglichkeit eröffnet auch im Mehrfamilienhaus einen bilanziellen Ausgleich zwischen Energiebedarf und Energieerzeugung zu erreichen. Sein Vorteil ist die Offenheit gegenüber unterschiedlicher Anlagentechnik, so dass sich bei der Umsetzung in der Praxis zahlreiche Lösungsmöglichkeiten ergeben und Bauherren und Planer nicht auf eine einzige Technik festgelegt sind. Das Passivhaus mit Energiegewinn muss nun in unterschiedlichsten Gebäuden und mit verschiedenen Techniken in der Praxis umgesetzt werden.

In diesem Bericht wurde die Machbarkeit des Passivhauses mit Energiegewinn im Mehrfamilienhaus untersucht. Die (Mehr-)Kosten wurden bisher nicht betrachtet. Berücksichtigt man jedoch besonders die steigenden Stromkosten der Haushalte der letzten Jahre, so besteht die Möglichkeit, dass die Mehrkosten für den Energiegewinn bei geeigneten Vermarktungskonzepten zukünftig bei konstanten Nebenkosten für die

Mieter refinanziert werden können. Dies wäre dann ein dreifacher Gewinn: für den Eigentümer, der seine Investition refinanzieren kann, für den Mieter, der von konstant niedrigen Nebenkosten profitiert (Passivhaus) und für die Umwelt durch minimale verbleibende Umweltbelastungen aus Passivhäusern mit Energiegewinn.

Weiterer Forschungsbedarf

Die in dieser Untersuchung vorgestellten Ergebnisse können nicht alle Fragen rund um Passivhäuser mit Energiegewinn beantworten. Zum einen werden Gebäude individuell geplant, so dass die Resultate der Parameterstudien nur Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen können. Zum anderen gibt es eine Reihe von Bereichen, in denen die Autoren noch weiteren Forschungsbedarf sehen. Dieser lässt sich mehreren Feldern zuordnen:

Bilanzierung

Bisher fällt es schwer, valide (Ziel-)Kennwerte für den Haushaltsstrom zu definieren, die bei der Planung eines Passivhauses mit Energiegewinn eingehalten werden müssen. Es fehlt einerseits eine ausreichende Datengrundlage, um Personen bezogene Effizienzanforderungen definieren zu können, anderseits ein entsprechendes Berechnungsverfahren, auch wenn die Autoren die Bilanzierung des Haushaltsstromes im PHPP für eine gute Basis für weitere Überlegungen ansehen.

Gleiches gilt für den Bereich der Warmwasserbereitung und der Festlegung von konkreten Anforderungen an den (Rest-)Energiebedarf zur Warmwassererwärmung. Hier sind, auch über das PH+E hinaus, neue Konzepte zur Senkung des Energieaufwandes erforderlich. Diese sollten dann auch in Hinweise für Planer umgesetzt werden.

Der Herstellungsenergieaufwand eines Gebäude kann auch heute schon bestimmt werden, der zeitliche Aufwand dafür ist einerseits beträchtlich, andererseits verhindert er insbesondere im Wohnungsbau die Integration in den Planungsprozess. Die graue Energie im Gebäude wird allenfalls im Nachhinein berechnet und ist im Bereich der Anlagentechnik aufgrund fehlender Eingangsdaten meist nur grob abgeschätzt. Hier sind im ersten Schritt einfache Berechnungs- und Planungswerkzeuge erforderlich, andererseits sollten mittelfristig Grenz- und Zielwerte für den Herstellungsenergieaufwand von Gebäuden erarbeitet werden.

Das Optimale Zusammenspiel von Gebäuden mit Wärmepumpe und solchen mit KWK ist bisher noch nicht bekannt. Dazu müssen umfangreichere Szenarienrechnungen erstellt werden, die die gegenseitigen Abhängigkeiten analysieren. Grundsätzlich können sich beide Techniken bei einer Gebäudeenergieversorgung der Zukunft sehr gut gegenseitig ergänzen. Dies führt zu einem Übergang von der Bilanz eines einzelnen Gebäudes hin zu Quartieren, Städten oder Ländern. Dabei sind jedoch noch eine Reihe von Abhängigkeit zu Untersuchen.

Anlagentechnik

Im Bereich Anlagentechnik sind in den nächsten Jahren vor allem kostengünstige Fassaden-Photovoltaiksysteme zu entwickeln, die mit minimalen Wärmebrückenwirkungen am Gebäude befestigt werden können. Besonders bei den elektrischen Energiespeichern ist eine Entwicklung hin zu kostengünstigen Systemen erforderlich, die sowohl die Anforderungen des Gebäudeeigentümers für eine Maximierung der Eigenverbrauchsdeckung erfüllen müssen, wie auch die Belastung der Elektrizitätsnetze durch die eingespeiste elektrische Energie minimieren. Hier sind vor allem Prognoseverfahren zur Bestimmung des optimalen Zeitpunktes bei der Speicherbeladung zu entwickeln.

Da Gebäude mit Energieüberschuss immer eine aufwändigere Anlagentechnik besitzen als konventionelle Neubauten, spielt die angepasste Regelungs- und Betriebsführungstechnik zukünftig eine wichtige Rolle. Hier sind Konzepte zu entwickeln und in der Breite zur Verfügung zu stellen, die die Kombination mehrere Energieerzeuger (wärme- und stromseitig) vereinfachen.

Heute noch exotische Ideen, wie Strom erzeugende Fenster oder Power-to-Gas-Systeme zur Gebäudeversorgung, die einen saisonalen Ausgleich zwischen Stromerzeugung und -verbrauch erlauben, könnten im nächsten Jahrzehnt die Perspektiven von Passivhäusern mit Energiegewinn erweitern.

Die Weiterentwicklung von Wärmepumpen hin zu einer immer höherer Effizienz wird aktuell stark voran getrieben und kann einen wesentlichen Beitrag zur Errichtung von Gebäuden mit Energiegewinn leisten.

Kosten

Bisher entstehen dem Bauherrn eines EffizienzhausPlus oder eines Passivhauses mit Energiegewinn durch die Energiegewinntechnik zusätzliche Kosten. Diese müssen in einem ersten Schritt aus den umgesetzten Bauvorhaben ausgewertet und analysiert werden, um die wirtschaftlichen Optimierungspotenziale identifizieren zu können. Um die entstehenden Mehrkosten refinanzieren zu können, müssen bei vermieteten Gebäuden die Rahmenbedingungen für einen Stromverkauf an die Mieter oder an Dritte deutlich verbessert, die gesetzlichen Regelungen vereinfacht und Musterlösungen entwickelt werden, die es einem Wohnungsunternehmen oder privaten Eigentümer erlauben, die Investitionen in Technik zur Erreichung des Energieüberschusses zu refinanzieren. Dies ist ein entscheidender Schlüssel, um Gebäude mit Energieüberschuss in der Breite voran zu bringen. Hier könnten auch neue Finanzierungsmodelle für die Zusatzkosten eines PH+E in Form von Contracting-Lösungen die Verbreitung solcher Ansätze vergrößern.

Nutzer im Passivhaus mit Energiegewinn

Untersuchungen zeigen, dass die Nutzer bzw. Mieter in Passivhäusern mit dem Komfort in den Gebäuden sehr zufrieden sind. Wird neue Technik eingeführt, dann ist es jedoch erforderlich, diese dem Nutzer zu erklären und ihm Hilfen zum optimalen Einsatz zu geben. Besonders bei Passivhäusern mit Energiegewinn, die die vorhandenen Effizienzpotenziale nahezu vollständig ausschöpfen, ist es wichtig, die nutzerabhängigen Potenziale ebenfalls zu erschließen. Damit werden Nutzerportale, Nutzerinterventionen und regelmäßige, aufbereitete Rückmeldung von großer Bedeutung sein. In diesem Bereich sind schon eine Reihe von Ansätze in der Erprobung, bisher zeichnen sich aber noch keine Konzepte als besonders zielführend ab. Hier sind weitere Entwicklungen und praxisnahe Erprobungen erforderlich.

Modellvorhaben

Um die Idee des Passivhauses mit Energiegewinn über wenige Pioniere hinaus stärker zu verbreiten, müssen gut dokumentiere Modellprojekte durchgeführt und im praktischen Betrieb analysiert werden. Diese sollen die Funktionsfähigkeit demonstrieren und Erkenntnisse über technologische und wirtschaftliche Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen und verbreiten. Über die Ansätze bei Neubauten hinaus sollten die Konzepte auch für Bestandsgebäude erprobt werden, denn bei diesen liegen die größten Potenziale zur Energieeinsparung in Deutschland.

7 Literaturverzeichnis

[Abrecht et al. 2008] Abrecht, Stefan; Kettner, Christiane; Meißner, Rolf (2008): Kollektorvergleiche – Wo sich Spreu und Weizen trennen http://www.ritter-xl-solar.com/uploads/media/ Wo_sich_Spreu_und_Weizen_trennen_ _Teil_1-3__HZJS_8_2008.pdf; 14.01.2014

[ASUE 2010] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hrsg.)(2010): BHKW-Grundlagen, Berlin 2010, http://asue.de/themen/blockheizkraftwerke/veroeffentlichungen/bhkw-grundlagen-2010.html; 31.05.2011

[ASUE 2011] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hrsg.)(2011): BHKW-Kenndaten 2011, Berlin 2011, http://asue.de/cms/upload/broschueren/2011/bhkw-kenndaten/asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf; 31.05.2011

[Auer, Schote 2014] Auer, Falk; Schote, Herbert (2014): Wärme aus der Umwelt auch gut für die Umwelt? Ergebnisse einer siebenjährigen Praxisuntersuchung; http://www.energie-experten.org/uploads/media/Schlussbericht_Feldtest_2006_bis_2013.pdf; abgerufen im Februar 2014

[Baxi] Angaben zum Gamma 1.0 von Baxi Innotec auf http://www.bhkw-prinz.de/baxi-innotech-gamma-1-0-brennstoffzellen-heizgerat/705, abgerufen am 13.01.2014

[BIB 2013] Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung: Pressemitteilung 9/2013 vom 24.07.2013 zur Pro-Kopf-Wohnfläche in Deutschland, http://www.bib-demografie.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Download/ Grafik_des_Monats/2013_07_pro_kopf_wohnflaeche.pdf;jsessionid=2FA046BD691D460AA49B37ABBF1E034C.2_cid284?__blob=publicationFile&v=3

[BINE 2013] BINE Informationsdienst (2013):Wärmepumpen sind bereit fürs Smart Grid; http://www.bine.info/index.php?id=39&no_cache=1&typ=30&artikel=2633&cHash=df9f6390f7d528e079bfd790ea86a210; 07.11.2013

[Biogasregister 2014] Darstellung zum Hintergrund des Biogasregisters, Internetdarstellung des Biogasregisters unter https://www.biogasregister.de/informationen/ueber-das-biogasregister/hintergrund.html, abgerufen am 24.01.2014

[BlueGen] Angaben zum BlueGen MG 2.0 von Ceramic Fuel Cells auf http://www.bhkw-prinz.de/ceramic-fuel-cells-limited-bluegen-brennstoffzelle/659, abgerufen am 13.01.2014

[BMVBS 2012] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2012): Wohnhäuser mit Plus-Energie Niveau – Definition und Berechnungsmethode; http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/Bauen/plus-energie-haus-definition-berechnungsmethode-anlage-1.pdf?__blob=publicationFile; 21.11.2012

[BMWi 2013] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013): Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung, Tabel-lenblatt 6a, letzte Änderung 21.5.2013, http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html, BMWi, 18.6.2013

[Burger 2012] Burger, Bruno (2012): Stromproduktion aus Solar- und Windenergie im Jahr 2011; Freiburg, 30.08.2012 http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/vortragsfolien-stromproduktion-aus-solar-und-windenergie-im-jahr-2011.pdf; 16.01.2014

[BWP 2005] Bundesverband WärmePumpe e.V (Hrsg.)(2005): Heizen und Kühlen mit Abwasser – Ratgeber für Bauherrn und Kommunen, München, 2005

[BWP 2013] Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2013): SG Ready-Label; http://www.waermepumpe.de/waermepumpe/qualitaetssicherung/sg-ready-label.html; 15.01.2014

[BZ_Wikipedia] Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle, entnommen aus der Wikipedia-Seite zu Brennstoffzellen, http://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzelle, aufgerufen am 13.01.2014

[Callux] Callux - Praxistest Brennstoffzelle fürs Eigenheim; Forschungsprojekt mehrerer Hersteller von Brennstoffzellenheizgeräte mit Förderung des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
www.callux.net, abgerufen am 14.01.2014

[dena 2011] dena (2011): Teilnahmebedingungen. dena-Modellvorhaben: „Auf dem Weg zum EffizienzhausPlus“ Klimaneutrales Bauen und Sanieren.
https://effizienzhaus.zukunft-haus.info/fileadmin/user_upload/Modellvorhaben/dena-Modellvorhaben_EffizienzhausPlus_TN-Bedingungen_04-2011.pdf; 01.06.2011

[dena 2011a] dena (2013): Initiative EnergieEffizienz+ Private Haushalte http://www.stromeffizienz.de; abgerufen im Februar 2013

[Diefenbach 2002] Diefenbach, Nikolaus (2002): Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen, Institut Wohnen und Umwelt GmbH http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie /werkzeuge/bewertungbiomasse.pdf; 27.04.2011

[ecopower] SBZ Monteur vom 12.02.2010, Gentner Verlag, Stuttgart, http://www.sbz-monteur.de/2010/02/12/das-mini-bhkw-ecopower/

[EPBD 2010] Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden vom 19.05.2010

[Feist 1997] Feist, Wolfgang: Lebenszyklusbilanzen im Vergleich: Niedrigenergiehaus, Passivhaus, Energieautarkes Haus, In: Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 8, Hrg.: W. Feist, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1997, Abbildung aus www.passipedia.de/passipedia_de/ grundlagen/energiewirtschaft_und_oekologie/graue_energie_und _passivhaus-standard?s[]=herstellungsenergie , abgerufen am 03.02.2014

[Galileo] Angaben zur Hexis Brennstoffzelle Galileo 1000 N auf
http://www.bhkw-prinz.de/hexis-ag-galileo-1000-n-brennstoffzellen-heizgerat/693, abgerufen am 13.01.2014

[Großklos et al. 2010] Großklos, Marc; Koch, Thilo; Diefenbach Nikolaus (2010): Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt a. M. – Planungsphase und Null-Emissions-Konzept; Institut Wohnen und Umwelt GmbH
http://www.energieland.hessen.de/mm/Endbericht_Planung_Sanierung_Rotlintstrasse.pdf; 08.05.2013

[Großklos 2011] Großklos, Marc (2011): Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt a. M. -Dokumentation der Bauphase; Darmstadt 2011; Institut Wohnen und Umwelt; ISBN 978-3-941140-17-2

[Großklos 2013] Großklos, Marc (2013): Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116 - 128 in Frankfurt am Main - Ergebnisse der messtechnischen Erfolgskontrolle; Endbericht, Darmstadt: IWU, 2013, 144 S.

[Großklos et al 2013] Großklos, Marc; Schaede, Margrit; Hacke, Ulrike: Ergebnisse der Modernisierung von sieben Mehrfamilienhäusern auf Passivhaus-Standard; in: 17. Internationale Passivhaustagung, Tagungsband zur Konferenz in Frankfurt, April 2013, S. 207-212

[Großklos et al. 2013a] Großklos, Marc; Schaede, Margrit: Practical experiences with refurbishing seven apartment buildings to zero-emission level; in: Book of Full Papers – sb 13 munich, Implementing Sustainability - Barriers and Chances, Tagungsband zur Konferenz in München, April 2013, S. 520 - 526

[Großklos, Frank 2013] Großklos, Marc; Frank, Milena: Monatlicher Verlauf des kumulierten Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Strommix; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 63. Jg. (2013), Heft 9, S. 32 - 35

[Hegger et al. 2013] Hegger, Manfred; Fafflock, Caroline; Hegger, Johannes; Passig, Isabell (2013): Aktivhaus das Grundlagenwerk – Vom Passivhaus zum Energieplushaus; Verlag Georg D.W. Callwey GmbH & Co. KG; München 2013; ISBN 978-3-7667-1902-7

[Hörner 2010] Hörner, Michael; Emmerich, Philipp (2013): Einsatzmöglichkeiten von Mini-BHWK im Liegenschaftsbestand des HI, Darmstadt 2010, Institut Wohnen und Umwelt

[HMUELV 2011] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.)(2011): Strom effizient nutzen – Wegweiser für Privathaushalte zur wirtschaftlichen Stromeinsparung ohne Komfortverzicht; Wiesbaden, 2011

[IEA 2008] International Energy Agency (2008): Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency – Key Insights from IEA Indicator Analysis; Paris 2008; OECD/IEA

[IEA 2009] International Energy Agency (2009): IEA expects energy use by new electronic devices to triple by 2030 but sees considerable room for more efficiency, IEA, Press Release May 2009

[IFEU 2008] IFEU, IE, FHW Berlin, Öko-Institut, TU Berlin: Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland; Endbericht mit Materialband, Verbundvorhaben im Auftrag des BMU, Heidelberg, Leipzig, Berlin, Darmstadt, 2008

[IFEU 2013] Weiß, U; Blömer, S.; Pehnt, M.: Ökologische Bewertung von Ökogas-Produkten, Hintergrundpaper für die EnergieVision e.V. Heidelberg, 20.12.2013

[Kaufmann et al. 2009] Kaufmann, Berthold; Peper, Søren; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang (2009): Sanierung mit Passivhauskomponenten, Planungsbegleitende Beratung und Qualitätssicherung Tevesstraße Frankfurt a.M.; Darmstadt 2009; Passivhaus Institut http://www.energieland.hessen.de/mm/Altbausanierung_Tevesstr_Ffm_Modernisierung_Beratung_2009.pdf; 02.10.2013

[KfW 2013] KfW-Programm Erneuerbare Energien "Speicher" (2013): Programmnummer 275 Finanzierung von stationären Batteriespeichersystemen in Verbindung mit einer Photovoltaikanlage https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-%28Inlandsf%C3%B6rderung%29/PDF-Dokumente/6000002700_M_275_Speicher.pdf; 01.10.2013

[Korte et al. 2013] Korte, Werner; Vogt, Georg; Gareis, Karsten (2013): Final Report – Saving Energy in Social Housing with ICT (eSESH); http://esesh.eu/fileadmin/eSESH/download/documents/eSESH_Final_Report.pdf; 09.01.2013

[Koschowitz 2004] M. Koschowitz, E.On Ruhrgas: Neue Technologien der Kraft-Wärme-Kopplung; Folie aus: Strom erzeugende Heizungen - Techniken für heute und morgen; ASUE-Fachtagung am 07.09.2006, Leipzig, Kaiserlautern, 2006

[Lange 2008] Lange, Bernhard (2008): Windenergie als Teil des Energieversorgungssystems – Resourcenbestimmung – Vorlesungsunterlagen, Institut für solare Energieversorgungstechnik; Kassel; 2008

[LfU 2013] Bayrisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.)(2013): Energie aus Abwasser - Ein Leitfaden für Kommunen; Augsburg; 2013

[Lion energy 2014] Internetseite des Herstellers Lion Energy sowie telefonische Auskunft von Herrn Schulte, Lion Energy, am 28.01.2014

[Loose 2012] Loose, Anja (2012): Kombination Solarthermie und Wärmepumpe; Vortragsunterlagen auf dem GREES Kolloquium Effiziente Energienutzung, Stuttgart, 6.6.2012; http://www.grees.uni-stuttgart.de/kolloquium/Kolloquium_2012/20120606_Loose.pdf

[Lücking, Hauser 2012] Lücking, Rolf-Michael; Hauser, Gerd (2012):Plusenergiehäuser – technische und ökonomische Grundlagen; Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2012

[Miara et al. 2011] Miara, Marek; Günther, Danny; Kramer, Thomas et al. (2011): Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb; Fraunhofer ISE; Freiburg; 2011 http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/ download/wp_effizienz_ endbericht_ langfassung.pdf; 30.10.2012

[Minergie 2012] Geschäftsstelle Minergie (2012): Minergie-A: Positive Bilanz, https://www.minergie.ch/tl_files/download/Broschuere_Minergie-A_web.pdf; 26.09.2013

[Panasonic 2013] https://eu-solar.panasonic.net/service/downloads-panasonic/?eID=tx_datamintsdamsearch_download&damId=2584; 09.04.2013

[Passipedia 2014] Messergebnisse zum Energieverbrauch von Passivhäusern, Zusammenfassung verschiedener Untersuchungen, www.passipedia.de, Passivhaus Institut, abgerufen 03.02.2014

[Peper et al. 2004] Peper, Søren; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer: Ein nordorientiertes Passivhaus – Messtechnische Untersuchung und Auswertung von 19 Wohnungen im Passivhaus-Standard in Frankfurt-Bockenheim, Grempstraße, Endbericht; Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004

[PHI 2013] Passivhaus Institut (2013): EnerPHit und EnerPHit+i - Zertifizierungskriterien für die Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten; http://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_enerphit_de.pdf; 02.10.2013

[Quaschning 1998] Quaschning, Volker; Hanitsch, Rolf (1998): Höhere Flächenausbeute durch Optimierung bei aufgeständerten Modulen; 13. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 1998; http://www.volker-quaschning.de/downloads/staffelstein1998_1.pdf, 28.01.2013

[Quaschning 2011] Quaschning, Volker: Energieaufwand zur Herstellung regenerativer Anlagen, http://www.volker-quaschning.de/datserv/kev/index.php, 18.10.2013

[Schaede, Großklos 2013] Schaede, Margrit; Großklos, Marc (2013): Passivhäuser mit Energiegewinn – Wissenschaftliche Begleitung Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main; Darmstadt 2013; Institut Wohnen und Umwelt; ISBN 978-3-941140-33-2

[Schleicher 2011] Schleicher, Tobias (2011): Effizienz-Ranking „Stromsparen in Haushalten“, Vortrag auf dem Kongress „Stromeinsparung in Haushalten“, Berlin, 02.12.2011

[Schreier et al. 2005] Schreier, Norbert; Wagner, Andreas; Orths, Ralf; Rotarius, Thomas: Solarwärme optimal nutzen; Cölbe/Marburg 2005; Wagner Co Solartechnik GmbH

[Sommer, Mesenhöller 2013] Sommer, K.; Mesenhöller, E.: Praktische Erfahrungen mit einem Brennstoffzellen-Mikro-KWK-Gerät für ein Wohngebäude; in HLH, 12/2013, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2013

[Sunpower 2013] SunPower Solarmodule der E-Serie: http://www.sunpower.de/haus/solarmodule-e20/; 17.07.2012

[Texheimer 2009] A. Texheimer: Untersuchung der Nutzungspotenziale von Klein-Windkraftanlagen im städtischen Bereich, Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2009

[TrinkwV 2001] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001): §14 http://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2001/index.html; 11.10.2013

[Twele 2013] Twele, Jochen (2013):Empfehlungen zum Einsatz kleiner Windenergieanlagen im urbanen Raum – Ein Leitfaden; Berlin 2013, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
http://kleinwind.htw-berlin.de/website/fileadmin/data/Download/ Kleinwind_Handlungsempfehlungen_HTW-Berlin.pdf; 16.5.2013

[Vaillant] Angaben zum Vaillant Brennstoffzellen Mikro-KWK auf
http://www.bhkw-prinz.de/vaillant-group-mikro-kwk-mit-brennstoffzelle/1865, abgerufen am 13.01.2014

[Voss et al. 2011] Voss, Karsten; Musall, Eike; Lichtmeß, Markus (2011): From low-energy to net Zero-Energs Buildings: Status and Perspectives; Journal of Green Building; Vol.6; No. 1, 2011; http://www.iea-shc.org/publications/downloads/a06_Voss.pdf, 22.6.2012

[Voss et al. 2011(2)] Voss, Karsten; Musall, Eike (2011): Nullenergiegebäude – Internationale Projekte zum Klimaneutralen Wohnen und Arbeiten; München 2011; ISBN 978-3-920034-50-8

[Voss 2013] Voss, Karsten (2013): Null- und Plusenergiegebäude: Methodische Einordnung, Projekte, Planungswerkzeuge, 49. Arbeitskreis Energieberatung am 07.03.2013 im Institut Wohnen und Umwelt, http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/ake49/AKE49-Voss.pdf; 14.03.2013

Anhang A - Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Verschiedene Gebäude aus dem Modellvorhaben zum Effizienzhaus Plus des BMVBS, oben links: Köln, oben rechts: Münnerstadt, unten links: Leonberg, unten rechts: Bischofswiesen 6

Bild 2: Realisiertes Passivhaus mit Energiegewinn in der Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main kurz vor der Fertigstellung des Gebäudes (die PV-Fassade an der Südseite ist auf dem Bild noch nicht montiert) 7

Bild 3: Frühe Gebäude mit dem Ziel „Ausgleich von Bedarf und Erzeugung"; links: Null(heiz)energiehaus Dörpe (1989), rechts: energieautarkes Solarhaus, Freiburg (1992) 9

Bild 4: Bilanzierung des Netto-Null-Energiehauses nach [Voss 2013] 11

Bild 5: LichtAktiv Haus (Bildquelle: www.velux.de) 11

Bild 6: Bilanzgrenzen nach EnEV, Null-Energie und Plusenergie 15

Bild 7: Graue Energie von Gebäuden unterschiedlicher Energiestandards [Feist 1997] 20

Bild 8: Spezifischer kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen von Photovoltaikanlagen nach GEMIS 23

Bild 9: Variation der Materialeinsätze zur Herstellung der Photovoltaikmodule 23

Bild 10: Auflistung unterschiedlicher Quellen für den Herstellungsenergieaufwand von PV-Zellen aus verschiedenen Materialien, aus [Quaschning 2011] 24

Bild 11: Vergleich verschiedener Varianten der Biomethan-Erzeugung, links: kumulierter Energieverbrauch, rechts: Treibhausgasemissionen [Schaede, Großklos 2013] 25

Bild 12: Prinzipieller Verlauf von Strombedarf und -erzeugung bei Gebäuden mit Wärmepumpe 27

Bild 13: Ganzheitliches Effizienzkonzept und regenerative Energien führen zum PH+E 28

Bild 14: Energieeinsparung durch Bau im Passivhausstandard im Vergleich zu EnEV 2009 und KfW55 29

Bild 15: Aufteilung des Energiebedarfs des Gebäudes Cordierstraße 4 in kWh/(m²a), links ohne, rechts mit Optimierungsmaßnahmen zur Reduktion der Verteilverluste 30

Bild 16: Reduktion der Verteilverluste der Warmwasserbereitung 31

Bild 17: Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser: Erhöhte Dämmung der Rohrleitungen mit 250 % nach EnEV (links), Einsatz einer Diaphragmalyse (Mitte) und Rohr-in-Rohr-System (rechts) 32

Bild 18: Elektrischer Energieverbrauch nach Bereichen 34

Bild 19: Energieeinsparung durch Haushaltsgeräte und Beleuchtung höchster Effizienzklassen 34

Bild 20: Haushaltsstrombedarf eines 2-Personen-Haushalts bei Nutzung von Standardgeräten (links) und mit effizienten Geräten (rechts) 35

Bild 21: Einsparpotenzial Standby-Verluste 36

Bild 22: Ressourceneinsparung durch Nutzerrückmeldung 38

Bild 23: Funktion der Wärmepumpe – schematische Darstellung 41

Bild 24: Gemessene Jahresarbeitszahlen verschiedener Wärmepumpentypen 42

Bild 25: Messergebnisse einer 7 jährigen Praxisuntersuchung zur Effizienz von Wärmepumpen 44

Bild 26: Abwasserwärmeübertrager für Neueinbau (links) und Einbau in bestehende Kanäle (rechts) 45

Bild 27: Schema des Eisspeichers mit Wärmepumpe (links), Innenleben eines Eisspeichers (oben rechts), Solarkollektor zur Regeneration (unten rechts) 46

Bild 28: Anlagenbeispiele der Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen 47

Bild 29: Solarthermie – Kollektorarten: Flachkollektor (oben links), Vakuumröhrenkollektor (oben rechts), Vakuumröhrenkollektor mit CPC-Reflektor (unten links), Funktion des Vokuumröhrenkollektor mit CPC-Reflektor (unten rechts) 49
Bild 30: Solarthermie: Kollektorkennlinien verschiedener Kollektortypen 49
Bild 31: Anlagenschema für eine Simulation mit CPC-Kollektoren und zwei Pufferspeichern 51
Bild 32: Energieeffizienz durch Kraft-Wärme-Kopplung 52
Bild 33: Anlagenschema eines BHKWs mit Abgaswärmeübertrager 53
Bild 34: Vergleich verschiedener Technologien zur KWK, deren typischer Leistungsbereiche sowie ihr elektrischer Wirkungsgrad [Koschowitz 2004] 55
Bild 35: Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle [BZ_Wikipedia] 56
Bild 36: Ansichten von zwei Brennstoffzellen-Heizgeräten, links eine SOFC, Mitte eine Niedertemperatur-PEMFC, recht Blick auf den Zellstapel einer PEMFC 58
Bild 37: links: Stirlingmotor im Schnitt, rechts: Funktionszeichnung eines Linearkolbenmotors [Lion energy 2014] 59
Bild 38: Beispiel einer Pelletheizung mit Brennwertnutzung [Paradigma 2014] 60
Bild 39: Mögliche Ergänzung des Biogasregisters zur transparenten Bilanzierung des Biogasbezugs bei einem einzelnen Gebäude (Bildquelle: [Biogasregister 2014] ergänzt um eigene Vorschläge) 62
Bild 40: Ertrag in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung 66
Bild 41: Aufständerung für süd-ausgerichtete Module (links), Zusammenhang zwischen Abstand und Verschattung (rechts) 66
Bild 42: Relative Abschattungsverluste abhängig vom Abschattungswinkel 67
Bild 43: Links: Beispiel einer Ost-West aufgeständerte Photovoltaikanlage, rechts: Ertrag bei Ost-West-Ausrichtung 67
Bild 44: Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Gebietes und Turbulenz des Windes 69
Bild 45: Leistungskurven von Windkraftanlagen; links: Klein-Windkraftanlage „Black 300“; rechts: Enercon E82 70
Bild 46: Leistungskurve, Windgeschwindigkeits-Verteilung und Ertragsverteilung 70
Bild 47: Anlagenposition – Draufsicht des Standortes mit möglichen Eignungsflächen und Richtungsverteilung der Energie (qualitative Darstellung) 71
Bild 48: Arten von Klein-Windkraftanlagen und Beispiele 72
Bild 49: Beispiel zur Installation von Kleinwindkraft am Gebäude (Plusenergie-Bürogebäude in Mainz) 73
Bild 50: Auswirkungen unterschiedlicher Stromkennzahlen auf die Stromerzeugung durch das wärmegeführte BHKW bei einem Gebäude mit thermischer Solaranlage 75
Bild 51: Auswirkungen unterschiedlicher Stromkennzahlen auf die Stromerzeugung durch das BHKW ohne thermische Solaranlage im Gebäude 75
Bild 52: Simulationsergebnisse der elektrischen Energieerzeugung einer Photovoltaikanlage eines PH+E für ein Jahr (hier am Beispiel des PH+E Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main) 76
Bild 53: Beispielhafte Photovoltaik- und Windenergieerzeugung sowie konventionelle Erzeugung im Verlauf über mehrere Tage 77
Bild 54: Tägliche Energiemengen der Windenergieerzeugung in Deutschland 78
Bild 55: Simulationsergebnisse der elektrischen Energieerzeugung eines BHKWs eines PH+E für ein Jahr (bei zusätzlicher Wärmeerzeugung einer solarthermischen Anlage) 79
Bild 56: Darstellung der Modellgebäude 1 bis 4 (bei den dunkelblauen Flächen an der Fassade und die blauen Flächen auf dem Dach handelt es sich um PV-Anlagen) 81

Bild 57: Einfluss der Größe der Modellgebäude, Referenzfall Anlagentechnik mit Solarthermie, Blockheizkraftwerk und Photovoltaik 85
Bild 58: Energiebilanz der Modellgebäude mit der Anlagentechnik Solarthermie, Blockheizkraftwerk und Photovoltaik 86
Bild 59: Photovoltaik-Ertrag auf dem Dach in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung der Photovoltaikmodule (ohne Berücksichtigung von Verschattung) 87
Bild 60: Photovoltaik-Ertrag eines Pultdaches in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung (100 % Ertrag entspricht einer Anlage mit 61,3 kWp und 30 ° Neigung) 88
Bild 61: Photovoltaik-Ertrag eines Flachdaches in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung (100 % Ertrag entspricht einer Anlage mit 46,6 kWp und 10 ° Neigung) 89
Bild 62: Ertrag der Photovoltaik-Fassade Abhängig von der Ausrichtung 90
Bild 63: Aufteilung der elektrischen Energieerzeugung bei der Anlagentechnik Solarthermie und Blockheizkraftwerk 91
Bild 64: Horizontverschattung des Daches für Frankfurt am Main (21.06.) 92
Bild 65: Photovoltaik-Ertrag auf dem Dach in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung der Photovoltaikmodule unter Berücksichtigung einer Verschattung von 15° 92
Bild 66: Verschattung der Fassade (Darstellung für 21.06.) und daraus resultierende Erträge abhängig von der Gebäudeausrichtung 93
Bild 67: Auswirkungen einer typischen Verschattung auf die Modellgebäude 93
Bild 68: Energiebilanz des Modellgebäudes 3 mit der Anlagentechnik Wärmepumpe (JAZ=3,5) + Photovoltaik 96
Bild 69: Überschuss bzw. Bezug der vier Modellgebäude mit einer Wärmepumpe (JAZ=3,5) und Photovoltaik 96
Bild 70: Einfluss unterschiedlicher Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe bei Modellgebäude 3 97
Bild 71: Überschuss bzw. Bezug des Modellgebäudes 3 bei unterschiedlicher Orientierung der Hauptfassade 98
Bild 72: Primärenergiebedarf der vier Modellgebäude bei unterschiedlicher Ausrichtung 99
Bild 73: Jährliche Globalstrahlung und mittlere Lufttemperatur im Winterhalbjahr in Deutschland 100
Bild 74: Auswirkungen unterschiedlicher Standorte bei Modellgebäude 3 102
Bild 75: Ergebnisse für Modellgebäude 3 mit der Anlagentechnik Solarthermie und BHKW bei Variation der Innentemperatur und des Warmwasserbedarfs 103
Bild 76: Ergebnisse für Modellgebäude 3 mit der Anlagentechnik Wärmepumpe bei Variation der Innentemperatur und des Warmwasserbedarfs 104
Bild 77: Modellgebäude 3: Primärenergiebilanz abhängig von Innentemperatur, Warmwasserbedarf und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 105

Hinweis zu den Bildern: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen von den Autoren.

Anhang B - Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bilanzierungsfragen für Gebäude mit Energiegewinn 13
Tabelle 2: Untersuchte Prozesse für PV-Strom in GEMIS 22
Tabelle 3: Kumulierter Energieverbrauch für PV-Module aus monokristallinem Silizium mit realen PV-Erträgen für Flachdächer, Standort Frankfurt am Main 24
Tabelle 4: Primärenergiefaktoren in kWh_{Pe}/kWh_{End} 26
Tabelle 5: Treibhausgasemissionen verschiedener Energieträger [GEMIS] 26
Tabelle 6: Anwendungen mit Hilfsenergieverbrauch (Auszug aus [Clausnitzer, Hoffmann 2009]) 37
Tabelle 7: zusätzliche Anwendungen mit Hilfsenergie in einem PH+E 37
Tabelle 8: Einflussgrößen auf die Effizienz von Wärmepumpen 43
Tabelle 9: Einflussgrößen auf den Ertrag solarthermischer Anlagen 51
Tabelle 10: Größen von Blockheizkraftwerken (BHKW) 53
Tabelle 11: Übersicht der wichtigsten Brennstoffzellentypen und deren Kennwerte [Quelle: BZ_Wikipedia, eigene Recherchen] 57
Tabelle 12: Exemplarischer Vergleich der Kenndaten unterschiedlicher SOFC-Brennstoffzellenheizgeräte 58
Tabelle 13: Exemplarisch Kennwerte einiger Stirling-Miko-BHKWs (Quelle: Herstellerangaben) 59
Tabelle 14: Gegenüberstellung verschiedener regenerativer Wärmeerzeuger 64
Tabelle 15: Einflussgrößen auf den Photovoltaikertrag des PH+E 65
Tabelle 16: Einflussgrößen auf den Energieertrag von Klein-Windkraftanlagen in Städten 73
Tabelle 17: Gegenüberstellung verschiedener elektrischer Energieerzeuger 80
Tabelle 18: Gebäudedaten der Modellgebäude 82
Tabelle 19: Randbedingungen der Bilanzierung, die bei den Parametervariationen variiert werden 83
Tabelle 20: verwendete Primärenergie- und Treibhausgas-Emissionsfaktoren für die Beispielrechnungen 84
Tabelle 21: Veränderung der Gebäudebilanz durch die Verschattung 94
Tabelle 22: Ergebnisse der Modellgebäude für eine Wärmeversorgung mit Solarthermie und BHKW, Referenzvariante verschattet 95
Tabelle 23: Klimadaten der Vergleichsstandorte 101