



Bachelorarbeit

im Studiengang Umwelttechnik der
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Optimierung der Produktion und Speicherung erneuerbarer Energien

am Beispiel des Effizienzhauses Plus in Berlin

Jan Rokahr

Matrikel-Nr.:1996276

Erstprüfer: Frau Dr.-Ing. Dagmar Rokita

Zweitprüfer: Herr Dipl.-Ing. Architekt

Peter-M. Friemert

HAW Hamburg

ZEBAU GmbH

Hamburg, März 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Effizienzhaus Plus Standard.....	2
2.1	Entwicklung des energieeffizienten Bauens	2
2.2	Definition des Effizienzhaus-Plus-Standards in Abgrenzung zu anderen Gebäudeenergiestandards.....	4
3	Das Effizienzhaus Plus in Berlin und seine technischen Anlagen	8
3.1	Idee und Umsetzung.....	8
3.2	Architektur.....	8
3.3	Baukonstruktion	11
3.3.1	Decke, Wand und Boden.....	11
3.3.2	Glasfassade	11
3.4	Haustechnik	11
3.4.1	Photovoltaik-Module	12
3.4.2	Batteriesystem.....	14
3.4.3	Luft- und Wärmeversorgung	15
3.4.4	Gebäudeautomation	15
4	Energiebilanz des Hauses.....	16
4.1	Bilanzierungsmodell.....	16
4.2	Messkonfiguration.....	17
4.3	Strom	19
4.3.1	Energieerzeugung	19
4.3.2	Energieverbrauch	21
4.3.3	Gegenüberstellung von Verbrauch und Erzeugung	22
4.4	Wärme	23
4.4.1	Energieerzeugung	23
4.4.2	Energieverluste.....	25
5	Maßnahmen zur Optimierung der Produktion	26
5.1	Technologien zur Stromerzeugung	26
5.1.1	Vergleich und Auswahl der PV-Module.....	26
5.1.2	Nutzung von Windenergie	29
5.2	Technologien zur Wärmeproduktion.....	31
5.2.1	Wärmepumpe.....	31
5.2.2	Solarthermie.....	35
5.2.3	Wärmeerzeuger mit biogenen Brennstoffen.....	36
5.2.4	Kraft-Wärme-Kopplung mit biogenen Brennstoffen.....	37
6	Maßnahmen zur Optimierung der Speicherung.....	37

6.1	Stromspeicherung.....	37
6.1.1	Akkumulatoren.....	37
6.1.2	Zusätzliche Nutzung von Elektrofahrzeugen.....	38
6.2	Wärmespeicherung.....	38
7	Neues Energiekonzept des Effizienzhaus Plus.....	40
7.1	Berechnungen.....	40
7.2	Vergleich altes und neues Energiekonzept und Diskussion der Ergebnisse.....	45
8	Schlussbetrachtung und Ausblick.....	47
	Abbildungsverzeichnis	48
	Tabellenverzeichnis	49
	Abkürzungsverzeichnis	50
	Nomenklatur	51
	Literaturverzeichnis.....	52
	Erklärung	56
	Anhang	57

1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland repräsentiert der Gebäudesektor rund 40 % des Endenergieverbrauchs (vgl. Pöschk 2012, S.17). Um diesen Anteil nicht nur zu verringern, sondern auch Energie zur Deckung des Stromverbrauchs beizutragen, hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung das Effizienzhaus Plus in Berlin gebaut. Dieses Modellvorhaben ist ein Haus, welches über ein Jahr bilanziert mehr Energie produziert, als es für seinen Betrieb benötigt.

In einer zwölfmonatigen Testphase, in der das Haus von einer vierköpfigen Familie bewohnt wurde, hat es nur neun Prozent des vorher laut Energieausweis berechneten Überschusses produziert. Aus diesem Grund ist das Ziel dieser Arbeit ein optimiertes Konzept zu entwickeln um den größtmöglichen Energieüberschuss zu erwirtschaften. Dies geschieht auf Grundlage der Messdaten aus der Testphase von März 2012 bis Februar 2013. Die Herausforderung wird dabei sein, anhand des Gebäudes und seinem Standort die beste Kombination aus verschiedenen erneuerbaren Energien auszuwählen.

Der Hauptteil der Arbeit gliedert sich in die geschichtliche Entwicklung des energieeffizienten Bauens, die Definition des Effizienzhaus-Plus-Standards und anderer Niedrig-Energie-Standards auf. Anschließend wird das Haus mit seinen technischen Anlagen, sowie seiner Energiebilanz detailliert vorgestellt. Die Gegenüberstellung verschiedener erneuerbarer Energien folgt daraufhin, welche mit einer Auswahl der jeweiligen Technologie und einem Zwischenfazit abgeschlossen wird. Abschließend fließen die gewonnenen Erkenntnisse in ein neues Energiekonzept für das Effizienzhaus Plus mit ein und es werden die Energiebilanzen des alten und neuen Konzeptes gegenübergestellt und verglichen.

Neben dem Berliner Effizienzhaus Plus gibt es noch andere Effizienzhaus Plus Projekte. Dieses Netzwerk umfasst derzeit einundzwanzig umgesetzte und vierzehn geplante Neubauten. Alle Gebäude werden messtechnisch begleitet und anschließend ausgewertet. Die Gebäude haben innovative Energie-Versorgungskonzepte, bei denen verschiedene Technologien in unterschiedlichen Zusammensetzungen miteinander getestet werden. Sie sollen dabei nicht nur genügend Energie für das Gebäude selbst produzieren, sondern auch noch Elektromobile oder benachbarte Gebäude mitversorgen. Alle Gebäude werden bewohnt und stellen daher reale Bedingungen für die Evaluierung dar. Aus den Erkenntnissen der Projekte lassen sich Rückschlüsse für ein optimales Energiemanagement im Zusammenspiel mit hocheffizienten Gebäudekomponenten schließen. Nachfolgende Bauprojekte können hieraus profitieren (vgl. BMVBS 2014a).

2 Effizienzhaus Plus Standard

Das Effizienzhaus Plus ist ein energieeffizientes Gebäude, welches aufgrund der verwendeten erneuerbaren Energien bilanziell einen Energieüberschuss erzeugt. Um einordnen zu können aus welchem Grund dieser neue Gebäudestandard vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung initiiert wurde, wird nachfolgend sowohl die Geschichte des energiesparenden Bauens beschrieben, als auch wichtige energiepolitische Ziele der Bundesregierung genannt. Die genaue Definition dieses Standards und seine Bemessungsgrundlagen werden in Abgrenzung zu anderen Niedrig-Energie-Konzepten definiert.

An dieser Stelle muss noch auf eine Ungenauigkeit hingewiesen werden. Umgangssprachlich wird im Zusammenhang mit Energie häufig von „Verlusten“ gesprochen. Energie ist aber eine Erhaltungsgröße und kann somit nicht verloren gehen. Betrachtet man ein bestimmtes System, kann Energie die Systemgrenzen verlassen oder sie wird in eine andere nicht betrachtete Energieform umgewandelt. In dieser Arbeit wird auch die Bezeichnung „Energieverluste“ verwendet, dies ist einer besseren Lesbarkeit geschuldet.

2.1 Entwicklung des energieeffizienten Bauens

Die Endlichkeit der fossilen Energieträger trat zum ersten Mal zwischen Oktober 1973 und April 1974 in das Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit. Damals verhängte die Organisation erdölexportierender Länder (OPEC) ein Ölembargo gegen die Vereinigten Staaten von Amerika und die Niederlande, weiterhin drosselte sie auch die Erdölexporte in andere westliche Industrienationen. Dies hatte einen rasanten Anstieg des Erdölpreises zur Folge, welcher als erste Ölkrise in die Geschichte einging (vgl. Schild/Brück 2010, S.1). Der Erdölpreis stieg von rund 2 Dollar pro Barrel auf über 11 Dollar pro Barrel (vgl. Erdmann/Zweifel 2008, S.191).

Seit dieser Zeit befasst sich die Regierung der Bundesrepublik Deutschland mit der Energieeffizienz des Gebäudesektors. Durch die Bestrebung, weniger Energie zu verbrauchen und sich damit unabhängiger von den erdölexportierenden Nationen zu machen, folgte im August 1977 die erste Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzV). Diese wurde 1982 und 1995 dem jeweiligen Stand der Technik angepasst. Die Nachweisverfahren wurden verfeinert und die Anforderungen deutlich verschärft. 2002 löste die Energieeinsparverordnung (EnEV) die Wärmeschutzverordnung ab. Und wurde um eine ganzheitliche Betrachtung der Wärmegewinne sowie -verluste von Gebäudehülle und Anlagentechnik zu ermöglichen mit der Heizungsanlagenverordnung zusammengelegt. 2004 folgten kleine Anpassungen in einer Novellierung der EnEV (vgl. Schild/Brück 2010, S.1).

Im Dezember 2002 wurde von der Europäischen Union die Richtlinie 2002/91/EG über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden erlassen. In dieser Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) wurde erstmals der Energiebedarf für Beleuchtung und Gebäudekühlung berücksichtigt, aber auch die Einführung von Energieausweisen zur Dokumentation der Energieeffizienz von Gebäuden gefordert. Um diese Richtlinie in nationales

Recht umzusetzen folgte eine Neufassung der EnEV im Jahr 2007 (vgl. BBR 2014b). In einer Änderung der EnEV 2009 wurde neben weiteren Verschärfungen der Energieanforderungen um durchschnittlich 30 Prozent, jetzt eine Miteinbeziehung des am Gebäude erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien möglich. Konkret bedeutet dies, dass der Strom jetzt vorrangig im Haus selbst genutzt werden muss und nur der Überschuss ins Versorgungsnetz eingespeist werden darf. Diese Vorgaben, sinkende Vergütungen für Strom aus erneuerbaren Energien und steigende Strompreise, machen eine möglichst hohe Eigennutzung der Energie immer interessanter (vgl. Schild/Brück 2010, S.1).

Die Richtlinie 2009/28/EG gibt erstmals vor, dass 20 Prozent des deutschen Energieverbrauchs bis 2020 durch erneuerbare Energien zu decken sind. Die Bundesregierung hat daher im September 2010 ein Energiekonzept vorgestellt, welches die energie- und klimapolitische Ausrichtung Deutschlands bis 2050 beschreibt, Tab.2-1 zeigt einige wichtige Ziele hieraus.

Tab.2-1 Energiepolitische Ziele der Bundesregierung (Quelle: BMWi/BMU 2010, S.5)

	2020	2050
Reduktion Primärenergieverbrauch¹	20 %	50 %
Anteil Erneuerbare Energien²	18 %	60 %
Reduktion Treibhausgasemissionen³	40 %	80 %
¹ Reduktion des Primärenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland, gegenüber 2008 ² Anteil Erneuerbarer Energien bezogen auf den Bruttoendenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland ³ Reduktion der Treibhausgasemissionen der Bundesrepublik Deutschland, gegenüber 1990		

Die neu gefasste Richtlinie 2010/31/EU wird durch eine EnEV-Novelle umgesetzt, welche ab 1. Mai 2014 in Kraft tritt. Sie sieht vor, dass ab 2016 bei Neubauten eine angemessene und wirtschaftlich vertretbare Senkung des Primärenergieverbrauch um durchschnittlich 25 Prozent verwirklicht wird. Ab 2021 sollen dann alle Neubauten nur noch einen sehr geringen oder nicht vorhandenen Energiebedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Kühlung aufweisen. Bei öffentlichen Gebäude soll dies bereits 2019 geschehen. Die noch benötigte Energie soll aus erneuerbaren Energiequellen stammen, welche nach Möglichkeit am Standort selbst oder in der Nähe des Gebäudes produziert wird (vgl. BBR 2014c).

Um diese Vorgaben umzusetzen, hat das BMVBS einen neuen Gebäudestandard initiiert. Der Effizienzhaus-Plus-Standard (EHP-Standard) erfüllt schon heute diese Kriterien und geht noch darüber hinaus. Das BMVBS erhofft sich, dass diese Modellvorhaben schnellstmöglich in die Baupraxis übergehen. Es wird sich zeigen, ob und wenn ja, wann diese von einer breiteren Masse angenommen und umgesetzt werden. Veröffentlicht vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) zeigt Abb.2-1, dass durch Demonstrationsvorhaben, welche das technisch Mögliche aufzeigen und gesetzliche Vorgaben der Primärenergiebedarf der Baupraxis immer weiter minimiert werden kann. Es ist aber fraglich, ob

die genannten Ziele der Bundesregierung mit den bis jetzt vorhandenen Vorgaben und Maßnahmen zu erreichen sind, da z.B. die Sanierungsrate im Gebäudebereich viel zu gering ist (vgl. Pöschk 2012).

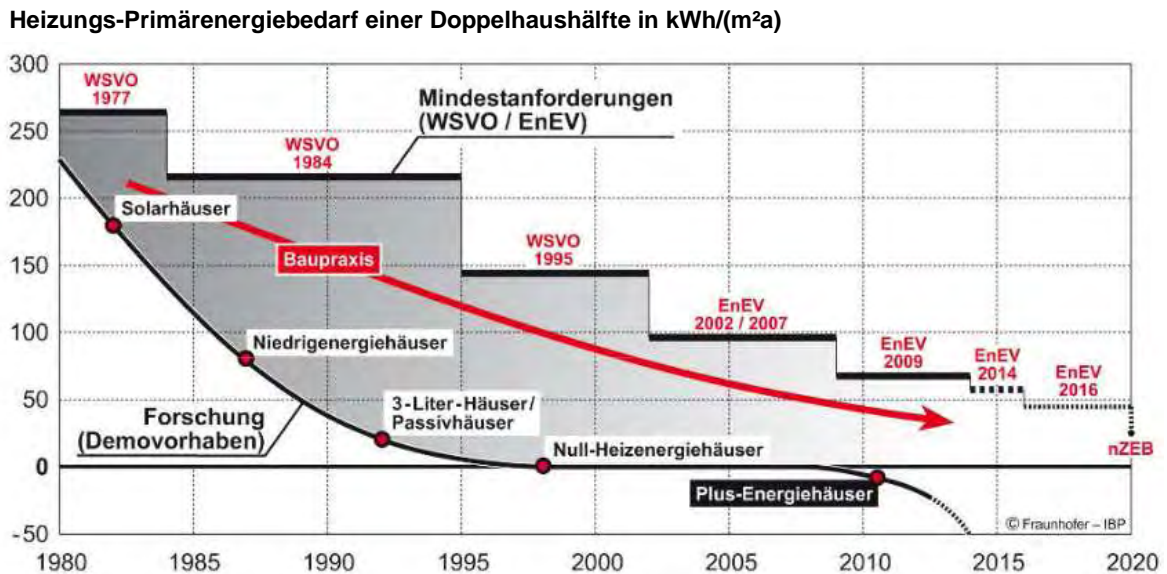


Abb.2-1 Entwicklung des energiesparenden Bauens in Deutschland (Quelle: Erhorn, geändert durch Verfasser)

2.2 Definition des Effizienzhaus-Plus-Standards in Abgrenzung zu anderen Gebäudeenergiestandards

Das weltweit erste Haus, welches im Jahresmittel mehr Energie produziert als es benötigt, ist das 1994 bezogene Heliotrop® in Freiburg. Es ist ein drehbares zylinderförmiges Gebäude, welches verschiedene erneuerbare Energien nutzt um eine im Jahresmittel positive Energiebilanz aufzuweisen (vgl. Fisch et al. 2012, S.57). Neben diesem Haus gibt es noch andere Plusenergiekonzepte, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird.

2011 veröffentlichte das BMVBS erstmals den Begriff *Effizienzhaus Plus*. Er wird folgendermaßen definiert:

„Das Effizienzhaus-Plus-Niveau ist erreicht, wenn sowohl ein negativer [spezifischer] Jahres-Primärenergiebedarf ($\sum Q_p < 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) als auch ein negativer [spezifischer] Jahres-Endenergiebedarf ($\sum Q_e < 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) vorliegen. Alle sonstigen Bedingungen der Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV) wie z.B. die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz sind einzuhalten.“
BMVBS (2012, S.5), ergänzt durch Verfasser

Der EHP-Standard ist der erste dieser Art im deutschsprachigen Raum, jedoch handelt es sich dabei nicht um eine gesetzliche Vorgabe. Die Anforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Wohngebäude gibt in Deutschland die EnEV vor, vgl. Kapitel 2.1. Es werden z.B. Höchstwerte für den Jahres-Primärenergiebedarf und den spezifischen Transmissionswärmeverlust von neuen Wohngebäuden anhand eines Referenzgebäudes angege-

ben (vgl. EnEV 2009, Anlage 1). Die Berechnung erfolgt nach DIN V 18599 oder alternativ nach DIN EN 832 in Verbindung mit DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10. Desweiteren müssen neu errichtete Gebäude einen Anteil ihres Energiebedarfs durch erneuerbare Energien decken. Dieser Anteil steht im Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG) und wird durch die eingesetzte Technologie vorgeschrieben (vgl. EEWärmeG 2009, Teil 2, § 5). Er beträgt zum Beispiel bei Gebäuden, die Geothermie oder Umweltwärme nutzen, mindestens 50 Prozent des Wärme- und Kälteenergiebedarfs. Als Nebenbedingung muss die Wärmepumpe sowohl über einen Strom- als auch einen Wärmemengenzähler verfügen. Eine Mindestanforderung an die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe wird ebenfalls vorgegeben.

Die Bewertungskriterien des Effizienzhaus-Plus-Standards gehen über die Anforderungen der EnEV hinaus. Sie werden auch nach DIN V 18599 berechnet, müssen aber zusätzlich noch den Primär- und Endenergiebedarf für Beleuchtung, Haushaltsprozesse und -geräte mitberücksichtigen. Hierzu ist ein pauschaler Wert von 20 kWh/(m²a) anzusetzen, jedoch nicht mehr als 2500 kWh pro Jahr und Wohneinheit. Die Primärenergiefaktoren sind abweichend zur EnEV anders gewichtet und sind Abb. A-1 des Anhangs zu entnehmen. Für Gebäude, die Fern- und/oder Nahwärme nutzen, werden die Werte gesondert nach DIN V 18599 berechnet. Desweiteren ist der in das Netz eingespeiste Strom analog zu den Primärenergiefaktoren des Verdrängungsstrommix zu bewerten. Der Verdrängungsstrommix bezieht sich auf die Zusammensetzung des Stroms, der zum Zeitpunkt der Einspeisung verdrängt wird (vgl. BMVBS 2011, S.6).

Die für den Betrieb des Hauses benötigte Energie soll erneuerbar erzeugt werden. Der dabei produzierte, aber nicht genutzte Überschuss, kann ins öffentliche Versorgungsnetz eingespeist werden. Das Netz dient dabei einerseits als Abnehmer, andererseits als Zwischenspeicher, aus dem wieder Energie bezogen wird, sobald vor Ort keine Energie produziert werden kann. Der Jahresenergiebedarf muss dabei negativ bleiben. Anders als bei der EnEV ist entweder die Grundstücksgrenze oder bei mehreren Gebäuden, der nutzflächenmäßige Anteil eines Gebäudes am gesamten Grundstück die Bilanzierungsgrenze. Dies erlaubt, die Gewinne aus erneuerbaren Energien, welche auf dem Grundstück erzeugt werden, mit in die Bilanzierung einzubeziehen. Als weiteres Kriterium ist der Eigennutzungsgrad der erzeugten erneuerbaren Energie auszuweisen. Dafür wird das Verhältnis von erzeugter zu genutzter Energie innerhalb der Bilanzgrenzen gebildet. Die Ermittlung findet in Anlehnung an die EnEV in Monatsbilanzen statt. Eine Nebenanforderung ist, dass die Gebäude nur mit Geräten der höchsten Energieeffizienzklasse (in der Regel A++ oder besser) und intelligenten Stromzählern ausgestattet werden müssen (vgl. BMVBS 2011, S.6).

Folgende Anforderungen sollten im Gebäudeentwurf nach Möglichkeit berücksichtigt werden, um die Vorgaben umzusetzen (vgl. BMVBS 2012, S.8f.):

- ❖ Optimale Ausrichtung, um möglichst hohe solare Gewinne zu erreichen
- ❖ Kompakter Gebäudekörper und guter Wärmeschutz

- ❖ Vermeidung von Wärmebrücken
- ❖ sicherstellen der Luftdichtheit
- ❖ kurze Leitungswege von Heizung, Lüftung und Warmwasser
- ❖ hydraulischer Abgleich, um Pumpenverbräuche zu minimieren
- ❖ Wärmerückgewinnung der Abluft und des Abwassers
- ❖ bedarfsgesteuerter Regelung von Heizung, Lüftung und Beleuchtung
- ❖ energieeffizienten Haushaltsgeräten und Beleuchtung
- ❖ Verbrauchsvisualisierungen, als schnelle Rückmeldung für die Bewohner

Um die in Kapitel 2.1 genannten Energieziele zu erreichen, wurden von der Bundesregierung verschiedene Anreizprogramme entwickelt. Diese sollen durch Subventionen Bauherren motivieren, energetisch höherwertige Gebäude zu bauen als gesetzlich vorgeschrieben. Zum Beispiel vergibt die KfW-Bankengruppe¹ zinsgünstige Kredite in Abhängigkeit zu den umgesetzten Maßnahmen. Zurzeit gibt es sechs unterschiedliche Modelle. Für diese **Effizienzhäuser** gilt, je mehr Energie eingespart wird, desto höher ist die Förderung. Die Effizienzsteigerung wird dabei als zusätzliche Reduktion des Jahresprimärenergiebedarfs Q_P und der Transmissionswärmeverluste H'_T gegenüber den Mindestanforderungen laut EnEV angegeben. Siehe hierzu auch Tab.2-2. Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass der Energieverbrauch für Beleuchtung und Haushaltsgeräte laut EnEV bei Wohngebäuden nicht berücksichtigt wird (vgl. Hegger et al. 2013, S.84).

Tab.2-2 KfW-Programme und deren prozentualer Unterschied gegenüber der Mindestanforderungen nach EnEV (nach Hegger et al. 2013, S.84)

Effizienzhaus	Q_P in kWh/(m ² a)	H'_T in W/(m ² a)	Geltungsbereich
115	115%	130%	Sanieren
100	100%	115%	Sanieren
85	85%	100%	Sanieren/Neubau
70	70%	85%	Sanieren/Neubau
55	55%	70%	Sanieren/Neubau
40	40%	55%	Sanieren/Neubau

Das **Passivhaus** Konzept hingegen besitzt andere Bilanzierungsrahmenbedingungen als die EnEV, weshalb man die Konzepte nicht einfach miteinander vergleichen kann. Für seine Berechnung wurde eigens ein Bilanzierungswerkzeug entwickelt: das Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP). Es basiert auf Grundlagen von Simulationsergebnissen, die auf Messungen aus der Praxis beruhen. Die unterschiedlichen Randbedingungen der Bilanzierungen nach EnEV und PHPP sind Tab.2-3 zu entnehmen (vgl. Hegger et al. 2013, S.85f.).

¹ Kreditanstalt für Wiederaufbau-Bankengruppe

Tab.2-3 Unterschiede der Randbedingungen - EnEV / PHPP (Quelle: Hegger et al. 2013, S.86)

	EnEV	PHPP
Bilanzumfang	Heizen, Kühlen, Hilfsenergie	Heizen, Kühlen, Hilfsenergie, Beleuchtung, Haushaltsgeräte
Bilanzgröße	H_T' und Q_P	H_T' und Q_P , Q_H^1 oder P_H^2
Solargewinne	pauschaler Verschattungsfaktor $F_S=0,9$	werden rechnerisch ermittelt
Bezugsgröße	Energiebezugsfläche $A_N = 0,32 \cdot V_e$	beheizte Wohnfläche
Bilanzintervall	Monat	Monat
Interne Wärmegewinne	5 W/m ²	ca. 2,1 W/m ² (mit effizienten Haushaltsgeräten)
Mittlere Raumtemperatur	19°C	20°C
¹ Jahresheizwärmebedarf		
² Heizleistungsbedarf		

In den Nebenbedingungen unterscheiden sich EnEV und PHPP weiterhin hinsichtlich der Betrachtung von Wärmebrücken, Luftdichtheit, Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage, sowie Fenstern und nichtdurchsichtigen Bauteilen. Die Kennwerte eines Passivhauses sind:

- ❖ spezifischer Jahresheizwärmebedarf < 15 kWh/(m²a)
- ❖ spezifischer Heizleistungsbedarf < 10 W/m²
- ❖ spezifischer Jahresnutzkältebedarf² < 15 kWh/(m²a)
- ❖ spezifischer Jahresprimärenergiebedarf < 120 kWh/(m²a)
- ❖ Übertemperaturhäufigkeit³ < 10%
- ❖ Lüftung mit Wärmerückgewinnung > 75%
- ❖ Strombedarf < 0,45 Wh/m³

Neben diesen beiden Konzepten gibt es noch das **Niedrigst- oder Nullenergie-Haus**. Gemäß der EU-Gebäuderichtlinie muss die Gesamtbilanz null oder fast null betragen. Welche Verbräuche mit in die Berechnung einfließen, ist aber nicht detailliert definiert und muss erst noch durch nationale Vorgaben festgelegt werden (vgl. Hegger et al. 2013, S.87-89). Andere seltener vorkommende oder ausländische Konzepte, wie zum Beispiel das Active-House-Konzept oder der Minergie-Standard aus der Schweiz, werden nicht betrachtet.

² Rechnerisch ermittelter Kühlbedarf, der benötigt wird um bei hohen Außentemperaturen die Temperatur innerhalb des Gebäudes auf einem Niveau zu halten.

³ Verhältnis zwischen den Stunden mit einer Temperaturüberschreitung von 25°C, zur Anzahl der Stunden eines Jahres.

3 Das Effizienzhaus Plus in Berlin und seine technischen Anlagen

3.1 Idee und Umsetzung

Das BMVBS lobte 2010 einen Realisierungswettbewerb aus, mit dem Ziel:

"anhand eines real gebauten, architektonisch attraktiven Forschungs-Pilotprojektes den Stand der Entwicklung in der Vernetzung von Elektromobilität mit energieeffizientem, nachhaltigen Bauen und Wohnen in der Bundesrepublik Deutschland aufzuzeigen." (BMVBS 2012, S.7)

Das Zusammenwirken zwischen den Bewohnern und neuen Gebäude- sowie Verkehrskonzepten wird hierbei auf seine Nachhaltigkeit, Alltagstauglichkeit und Marktfähigkeit erforscht. Der zentrale Gedanke ist, dass das Gebäude mehr Energie produziert als es benötigt. Mit diesem Überschuss kann man Elektrofahrzeuge betreiben oder die Energie ins öffentliche Versorgungsnetz einspeisen (vgl. BMVBS 2012, S.9). Da das Haus und die Elektrofahrzeuge vollständig erneuerbare Energie nutzen, wird kein klimaschädliches CO₂ freigesetzt. In dieser Arbeit wird die Nutzung der Elektromobilität nicht weiter betrachtet. Sie wird nur als eine Möglichkeit zum Speichern elektrischer Energie aufgeführt. Ein weiterer wichtiger Faktor ist, dass möglichst alle Materialien des Gebäudes am Ende seiner Nutzung vollständig recycelbar sind (vgl. BMVBS 2012, S.26).

3.2 Architektur



Abb.3-1 Lageplan-Maßstab 1:1000 (Quelle: BMVBS 2012, S.7)

Abb.3-1 zeigt den Standort des EHP in der Berliner Innenstadt. Es ist ein zweigeschossiges Gebäude, welches nicht unterkellert ist und auf Streifen- und Einzelfundamenten aus Stahlbeton ruht (vgl. BMVBS 2012, S.17). Das Haus nutzt die gesamte zur Verfügung gestellte Fläche des Baufeldes aus. Dadurch kann die Dachfläche mit den darauf montierten Photovoltaik-Modulen maximal genutzt werden (vgl. BMVBS 2012, S.8). Die wichtigsten baulichen Daten und Gebäudekennwerte sind in Tab.3-1 zusammengefasst.

Tab.3-1 Bauliche Angaben und Gebäudekennwerte (Quellen: BMVBS 2012, S.7, BMVBS B 2013, S.2, vgl. Sobek 2011)

Standort:	Berlin, D
Bauherr:	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Raumordnung
Architekt:	Büro Werner Sobek, Stuttgart
Haustechnik:	Werner Sobek Green Technologies, Stuttgart
Brutto-Grundfläche:	187 m ²
Beheizte Nettogrundfläche:	149 m ²
Hüllfläche:	475 m ²
Beheizte Gebäudevolumen:	634 m ³
Hüllflächenfaktor (Fläche/Volumen):	0,75 m ⁻¹
Fensterfläche:	134 m ²
Spezifischer Transmissionswärmeverlust der Gebäudehülle:	0,33 W/(m ² K)

An der Südfassade wird über Dünnschicht-Photovoltaik-Module Energie gewonnen, die geschlossene Fassade auf der Nordseite minimiert hingegen die Wärmeverluste. Auf der, der Fasanenstraße zugewandten Westseite befinden sich der Haupteingang und das Schaufenster des Hauses. Im Schaufenster können sich Besucher auf Informationsdisplays über das Haus und seine Eigenschaften informieren. Durch die vollständig verglaste Fassade können sich Besucher den Energiekern des Hauses anschauen, dieser beherbergt alle technischen Funktionen, sowie die Ladesysteme der Elektrofahrzeuge, siehe Abb.3-2 (vgl. BMVBS 2012, S.8f.).

Eine Grünfläche mit Baumbestand und die Terrasse befinden sich auf der Ostseite des Hauses. Sämtliche Wohnräume grenzen an diese Seite. Auch hier ist die Fassade vollflächig verglast. Sie lässt sich, im Gegensatz zur Westfassade, aber über mehrere Türen öffnen. Das architektonische Konzept des modular aufgebauten Hauses ermöglicht eine flexible Nutzung des Innenraums. Die Grundrisse des Ober- und Untergeschosses sind in Abb.3-3 und Abb.3-4 zu sehen. (vgl. BMVBS 2012, S.9f.)



Abb.3-2 Effizienzhaus Plus (Quelle: Koslik 2014)

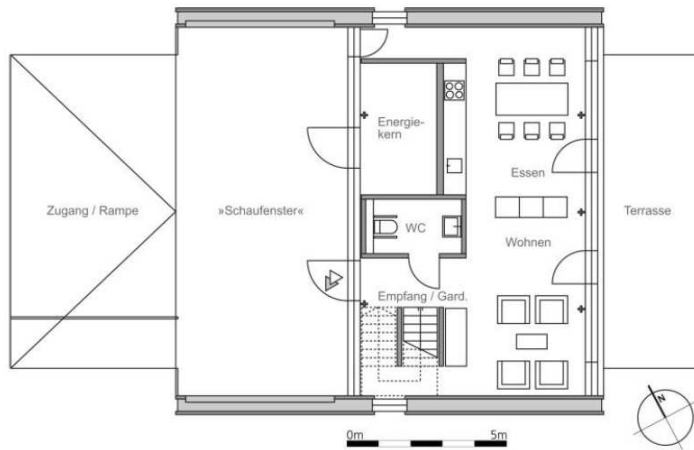


Abb.3-3 Grundriss EG (Quelle: IBP 2013, S.5)



Abb.3-4 Grundriss OG (Quelle: IBP 2013, S.5)

3.3 Baukonstruktion

Durch einen geringen Wärmedurchgangskoeffizienten der Fassade und die wärmebrückenreduzierte Konstruktion ist ein geringer Transmissionswärmeverlust aller Bauteile sichergestellt worden. Dadurch lassen sich die thermischen Verluste durch die Außenhülle minimieren.

3.3.1 Decke, Wand und Boden

Die Geschossdecken, die Wände und auch der Boden des Gebäudes sind in Holztafelbauweise hergestellt. Sie unterscheiden sich nur geringfügig voneinander, daher wird hier exemplarisch in Abb.3-5 eine Außenwand dargestellt. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Außenbauteile beträgt $0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (vgl. IBP 2013, S.6), womit die Anforderungen laut EnEV erfüllt werden (vgl. EnEV 2009, Anlage 1). Sämtliche Fassadenelemente werden, soweit es technisch möglich ist, ohne Verklebungen hergestellt. Beim späteren Um- oder Rückbau des Gebäudes ist so eine einfache und möglichst sortenreine Trennung der Einzelteile zu erreichen (vgl. BMVBS 2012, S.17).

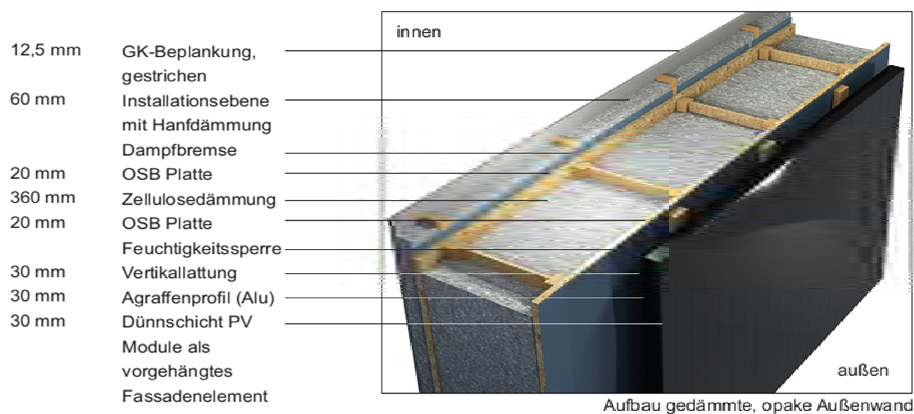


Abb.3-5 Aufbau gedämmte opake Außenwand (Quelle: BMVBS 2012, S.17)

3.3.2 Glasfassade

Die großen Glasfassaden in Ost- und West-Ausrichtung sowie die vier Fenster in der Mitte der Nord- und Südfassade bestehen aus Drei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die Scheibenzwischenräume werden mit Argon gefüllt, dies verstärkt die Wärmedämmwirkung der Fenster. Der Wärmedurchgangskoeffizient für die Fenster-Rahmen-Konstruktion beträgt $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (vgl. IBP 2013, S.6). An der Ostfassade ist ein Sonnenschutz mit außenliegenden Aluminiumlamellen angebracht, welcher manuell oder durch die Gebäudeautomation gesteuert, für den sommerlichen Wärmeschutz sorgt (vgl. BMVBS 2012, S.17).

3.4 Haustechnik

Die einzelnen Komponenten der Haustechnik und deren Zusammenwirken werden im Haustechnikkonzept Abb.3-6 dargestellt und anschließend erläutert.

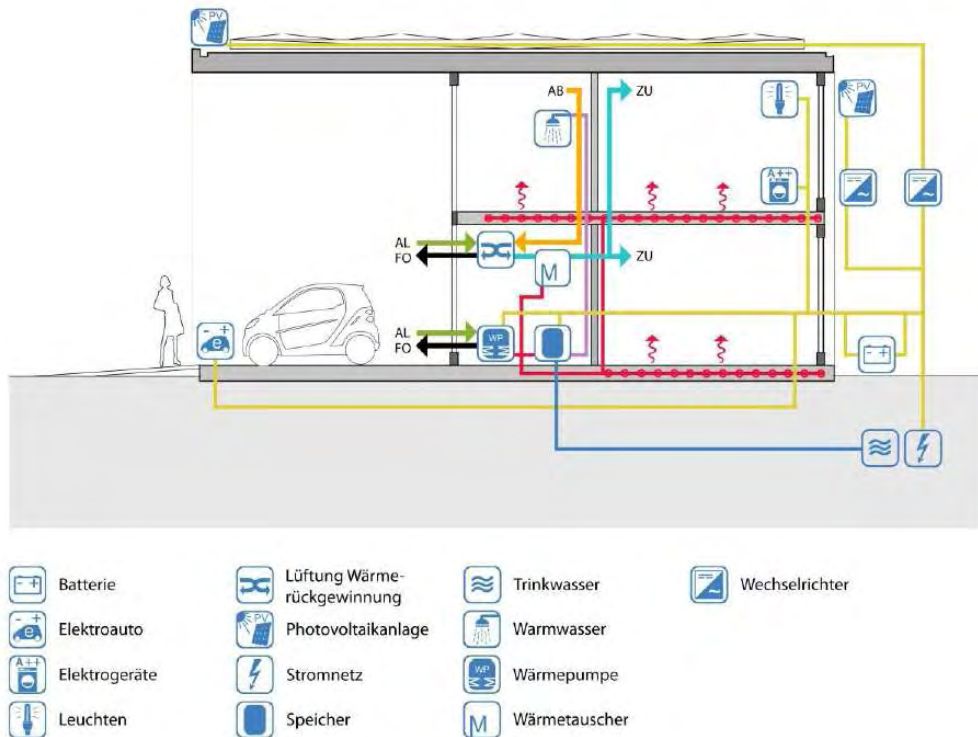


Abb.3-6 Haustechnikkonzept (Quelle: IBP 2013, S.7)

3.4.1 Photovoltaik-Module

Die elektrische Energie wird über zwei Photovoltaik-Anlagen produziert. Hierzu sind auf dem Dach und an der Südfassade PV-Module installiert. Eine Übersicht der wichtigsten Daten ist **Tab.3-2** zu entnehmen. Falls der produzierte Strom nicht genutzt wird, kann er im hauseigenen Akkumulator (Akku) zwischengespeichert werden, vgl. Kapitel 3.4.2. Wenn der Akku voll ist und der produzierte Strom nicht im Haus benötigt wird, wird er ins Versorgungsnetz eingespeist.

Tab.3-2 Technische Daten PV-Module (Quelle: BMVBS 2012, S.9)

	Dach	Fassade
Fläche	98,2 m ²	73,0 m ²
Nennleistung	14,1 kW	8,0 kW

Photovoltaik-Dach

Auf dem Dach sind sechzig monokristalline PV-Module⁴ mit einer Nennleistung von je 235 W verbaut. Die Module sind in Ost/West-Ausrichtung aufgeständert, siehe Abb.3-7. In Simulationen, welche die Umgebung mit einbeziehen, wurde berechnet, dass durch diese Ausrichtung und die Flächenmaximierung der größte Ertrag zu erwarten ist (vgl. BMVBS 2012, S.13). Der Wirkungsgrad eines Moduls beträgt unter STC-Prüfbedingungen:

⁴ Bosch M 235 3 BB, Datenblatt in Anhang

$$\eta = \frac{P_{\text{MPP}}}{H \cdot A} = \frac{235 \text{ W}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 1,46 \text{ m}^2} \cdot 100 \% = 16,1 \% \quad (3.1)$$

Die Module haben einen Leistungs-Temperaturkoeffizienten von -0,46 %/K. Laut Angaben des BMVBS sind die Module in West-Ausrichtung mit einem Azimutwinkel von 115° und in Ost-Ausrichtung von -65° ausgerichtet. Die Neigung beträgt jeweils 10°. In der näheren Umgebung des Hauses befinden sich Gebäude und Bäume, welche die PV-Module im Jahreszeitenwechsel teilweise verschatten. Darum sind die Module zu drei Strängen miteinander verschaltet. Der eingesetzte Wechselrichter ist ein SMA STP 15000 TL-10.



Abb.3-7 Blick auf das Dach von Nord-Ost (Quelle: ENBAUSA 2014)

Photovoltaik-Fassade

An der Südfassade des Gebäudes sind 100 Dünnschicht-PV-Module⁵ aus Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) angebracht. Ein Modul hat eine Nennleistung von 80 W, der Azimutwinkel beträgt 25° und die Neigung 90°. Der Temperaturkoeffizient der Modulleistung wird mit -0,36 %/°C angegeben mit einem Modulwirkungsgrad unter STC-Prüfbedingungen von:

$$\eta = \frac{P_{\text{MPP}}}{H \cdot A} = \frac{80 \text{ W}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,72 \text{ m}^2} \cdot 100 \% = 11,1 \% \quad (3.2)$$

Die Module sind vor der Fassade auf einem Unterbau befestigt und werden dadurch hinterlüftet. Direkt vor der Fassade steht eine Skulptur, welche einen Teil der PV-Module über den Tagesgang verschattet, siehe hierzu auch Abb.3-8. Die Module sind ebenfalls zu drei Strängen miteinander verschaltet und als Wechselrichter kommen drei SB 2500 HF-30 der Firma SMA zum Einsatz.

⁵ StoVentec ARTline Invisible, Datenblatt in Anhang



Abb.3-8 Blick auf die Südfassade (Quelle: Manu 2014)

3.4.2 Batteriesystem

Die von den PV-Modulen erzeugte Energie wird, falls sie nicht im Haus genutzt wird, in einem Lithium-Ionen-Akkumulator zwischengespeichert, siehe Abb.3-9. Der Akkumulator besteht aus ehemaligen Fahrzeug-Akkus, welche aufgrund einer Leistungsreduktion nur noch über ca. 80 % der ursprünglich verfügbaren Kapazität verfügen und daher nicht mehr von der Automobilindustrie verwendet werden. Sie wurden für den Hausbetrieb zusammengeschaltet und weisen eine Kapazität von ca. 40 kWh auf (vgl. BMVBS 2012, S.21). Der Akku befindet sich wegen brandschutztechnischer Maßnahmen in einem Gehäuse außerhalb des Gebäudes. Das Gehäuse muss, um eine optimale Umgebungstemperatur zu gewährleisten, im Sommer gekühlt und im Winter geheizt werden. Die hierfür benötigte Energie fließt nicht in die Energiebilanz des Hauses mit ein, sie wird unter dem projektspezifischem Energieverbrauch aufgeführt, vgl. Kapitel 4.2.



Abb.3-9 Gehäuse des Akkumulators, Links: elektronische Bauteile mit Lade- u. Wechselrichter, Rechts: Akkumulator-zellenblock (Quelle: BBR 2012)

3.4.3 Luft- und Wärmeversorgung

Aufgestellt im Technikraum des Hauses, erwärmt eine Luft-Wasser-Wärmepumpe⁶ das Trinkwarmwasser und versorgt die Fußbodenheizung sowie die Lüftungsanlage mit thermischer Energie. Sie nutzt die Außenluft als Wärmequelle und hat eine Heizleistung von 5,8 kW mit einer Leistungszahl von $\varepsilon = 2,7$ bei einer Außentemperatur von -7°C und einer Heizwasser-Vorlauftemperatur von 35°C . Die Leistungszahl gilt nur bei bestimmten Betriebsbedingungen, z.B. der genannten Außen- und Vorlauftemperatur:

$$\varepsilon = \frac{\text{Heizleistung}}{\text{el. Antriebsleistung}} = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}} \quad (3.3)$$

Das Haus besitzt zudem einen 300 l fassenden Warmwasserspeicher⁷, welcher bei Bedarf über einen Heizstab zusätzliche Wärmeenergie erzeugen kann. Der Heizbedarf wird in den Wintermonaten über eine Fußbodenheizung gedeckt. Neben der Fußbodenheizung, welche in den Boden des Erd- und Obergeschosses eingebaut wurde, ist zusätzlich Trockenestrich eingebracht worden, um die thermische Speicherkapazität zu erhöhen.

Eine mechanische Be- und Entlüftungsanlage minimiert den Wärmeverlust durch Lüftung, da die in der Abluft enthaltene Wärme über einen Kreuzstrom-Wärmetauscher zu mehr als achtzig Prozent wieder zurückgewonnen wird. In ungefähr anderthalb Stunden kann das komplette Luftvolumen des Hauses ausgetauscht werden, da der Volumenstrom der Anlage bis zu 400 m³/h beträgt. Bei Bedarf erwärmt ein von der Wärmepumpe mitversorgtes Zuluft-Nachheizregister die angesogene Luft. Die Verteilerleitungen und Luftkanäle im Haus sind wärmegeklämmt und so kurz wie möglich verlegt, um die Verteilungsverluste zu minimieren. Die Zuluft für die Wärmepumpe und die Lüftungsanlage wird neben der Tür zum Technikraum eingesogen und in den Zwischenraum zwischen Erdreich und aufgeständerter Bodenplatte abgeleitet. Es gibt keine Möglichkeit der aktiven Kühlung.

3.4.4 Gebäudeautomation

Durch das autonom arbeitende Energiemanagementsystem soll eine Optimierung der Energieströme des Gesamtsystems erfolgen. Das Zusammenspiel zwischen der PV-Anlage, den elektrischen und thermischen Speichern, sowie den Fahrzeugen und dem Versorgungsnetz wird durch das Energiemanagement gesteuert. Durch einen möglichst großen Eigenverbrauch der am Gebäude produzierten Energie soll der Netzbezug minimiert werden. Desweiteren wird versucht, den finanziellen Ertrag mit zu berücksichtigen, indem die Netzeinspeisung möglichst in Hochtarifzeiten und der Netzbezug in günstigen Tarifzeiten statt findet. Zum Beispiel wird der Ladevorgang der Elektrofahrzeuge an das zu erwartende Angebot an elektrischer Energie angepasst. Das heißt, sie werden zum Laden entweder in Energieüberschusszeiten vom Gebäude versorgt oder beziehen ihren Strom nachts aus dem Versorgungsnetz (vgl. BMVBS 2012 , S.24).

⁶ Weishaupt WWP L 8 IK, Datenblatt im Anhang

⁷ Weishaupt WAC 300, Datenblatt im Anhang

Mit einem Smartphone oder über zwei Touchpanels lässt sich die Gebäudetechnik bedienen. Die Touchpanels sind jeweils im Flur des Erdgeschosses und des Obergeschosses angebracht. Durch diese lässt sich zum Beispiel die Temperatur der einzelnen Räume oder die Außenjalousien steuern. Die Beleuchtung wird über Präsenzmelder gesteuert, kann aber auch manuell über das Touchpanel bedient und gedimmt werden.

4 Energiebilanz des Hauses

Das folgende Kapitel befasst sich mit den Energieerzeugern und -verbrauchern innerhalb des Hauses. Betrachtet wird der Messzeitraum von 01.03.2012 bis 28.02.2013. In diesem Zeitraum hat eine vierköpfige Familie in dem Haus gewohnt, um es unter realen Bedingungen zu testen. Zur Optimierung der Produktion und Speicherung erneuerbarer Energien in und am Effizienzhaus Plus wird nachfolgend detailliert dokumentiert, wie viel Energie während des Messzeitraums im Haus gewonnen und verbraucht wurde. Daraus ergibt sich dann die Grundlage für die darauffolgende Optimierung, mit dem neuen Energiekonzept des EHP's.

Während der Recherche ergaben sich Differenzen zwischen den Monitoring-Daten des IBP und den im Kurzbericht angegebenen Werten. Sie betragen +11 kWh für den Gesamtertrag der PV-Module und +20 kWh für die benötigte elektrische Energie der Wärmepumpe. Die Gründe hierfür konnten nicht festgestellt werden. Es werden daher nachfolgend die Daten aus dem Fraunhofer-IBP Kurzberichts verwendet, da sich alle Abbildungen auf diese Werte beziehen.

4.1 Bilanzierungsmodell

Eine Bilanz ist immer nur eine rechnerische und damit theoretische Abbildung eines Gebäudes unter festgelegten Bedingungen. Folgend werden die Bedingungen für die Bilanzierung des Effizienzhauses Plus in Berlin aufgestellt. Später wird der vorherberechnete Energiebedarf mit dem tatsächlichen Bedarf im Betrieb verglichen. Der reale Energieverbrauch kann vom vorherberechneten stark abweichen, da er von Parametern beeinflusst wird, die in einer Bilanz nur schwer darstellbar sind. Zum Beispiel kann unterschiedliches Verhalten der Bewohner oder eine falsche Kalibrierung der Gebäudetechnik zu einem anderen Ergebnis der realen Verbräuche führen. Der Bilanzraum soll das komplexe System von Energieübergängen, -verlusten und -gewinnen sinnvoll differenzieren und mit anderen Häusern vergleichbar machen. Er befindet sich innerhalb der Bilanzgrenze, welche in Kapitel 2.2 schon als die Grundstücksgrenze definiert wurde.

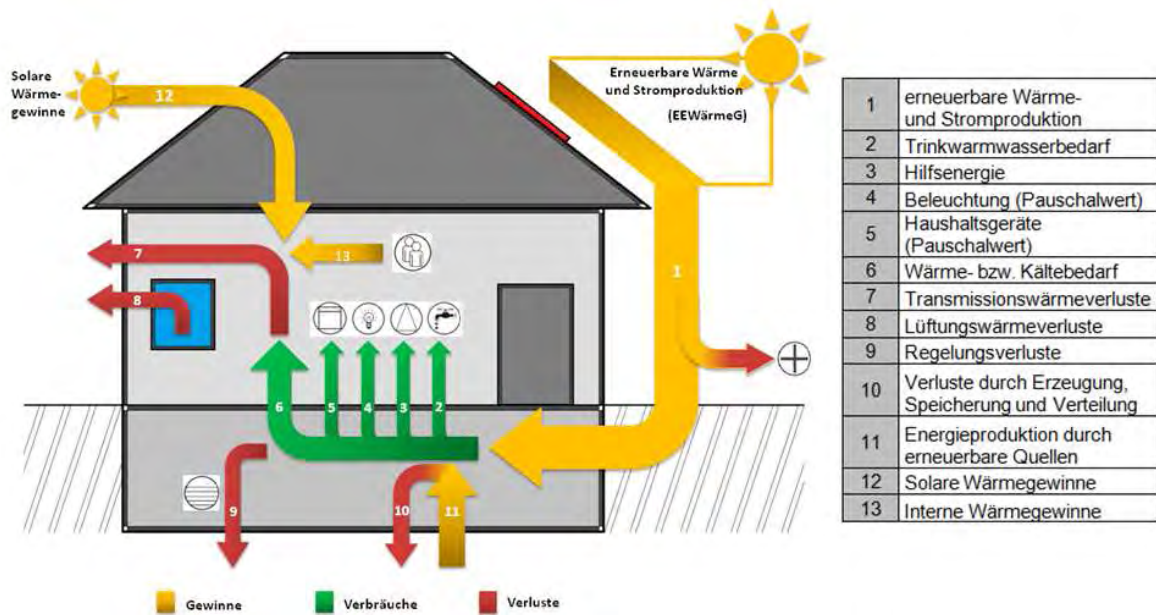


Abb.4-1 Energiebilanz des Effizienzhaus Plus (nach Hegger et al. 2013, S.91)

Das Bilanzkriterium ist die Primär- bzw. Endenergie, welche innerhalb der Bilanzgrenzen verbraucht bzw. produziert wird. Abb.4-1 zeigt das Bilanzierungsmodell und die Verknüpfung der einzelnen Energieströme innerhalb des Gebäudes. Diese werden im einjährigen Bilanzierungsintervall betrachtet. Die Energiebilanz bezieht sich nur auf den Betrieb des Hauses. Energie, die benötigt wurde um das Haus herzustellen oder um es später wieder zurück zu bauen, wird nicht betrachtet.

4.2 Messkonfiguration

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik erfasst Daten zu Stoff- und Energieströmen des Effizienzhaus Plus im Rahmen eines Monitoring-Programms über zwei Jahre. Die messtechnischen Konfigurationen werden im Folgenden beschrieben.

Abb.4-2 zeigt die Messkonfiguration **Elektroversorgung**. In jedem Raum werden die Temperatur, die Luftfeuchte und der Kohlendioxidgehalt aufgezeichnet. Dies erfolgt ohne festes Zeitraster, wobei nur Werteänderungen erfasst werden. Das kleinste Zeitintervall beträgt hierbei 20 ms. Mit diesen Parametern lassen sich Heizung und Lüftungsanlage je nach Bedarf steuern. Das Außenklima wird über Messungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchte erfasst. Auf dem Dach wird sowohl die horizontale, als auch die vertikale Globalstrahlung gemessen, um Rückschlüsse auf die Effizienz der PV-Module an Dach und Fassaden zu ermöglichen. Desweiteren wird die momentane Leistung und die Strommenge der letzten 24 Stunden für die Produzenten und Verbraucher des Hauses gemessen, damit der Energiefluss innerhalb des Gebäudes möglichst genau erfasst werden kann (vgl. IBP 2013, S.10).

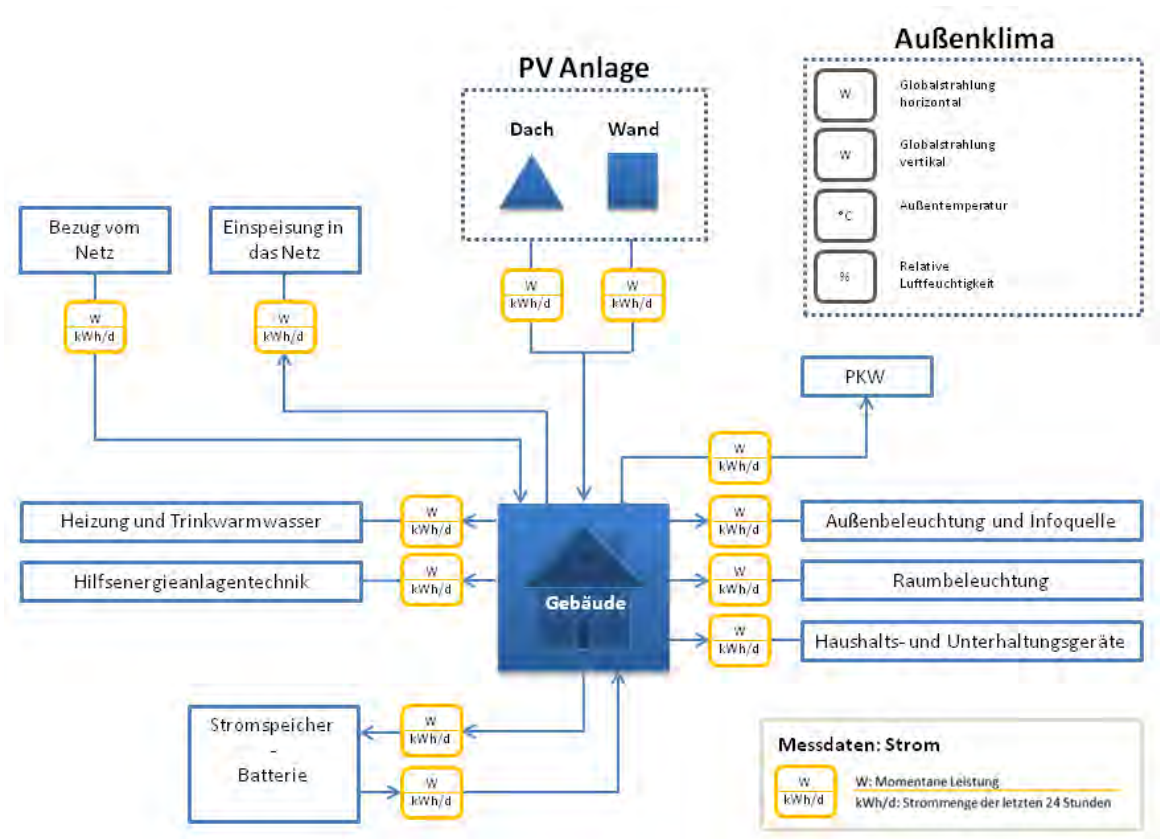


Abb.4-2 Messkonfiguration Elektroversorgung (nach IBP 2013, S.10)

Der Stromverbrauch des Effizienzhauses setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

- ❖ Der Stromverbrauch für den Hausbetrieb (Heizung, Warmwasser, Lüftung, Gebäudeautomation, Beleuchtung, Haushaltsgeräte und sonstige Verbraucher im Haushalt)
- ❖ Der projektspezifische Stromverbrauch (Infomonitore, Außenbeleuchtung, Energieverbräuche für sonstige Forschungsprojekte im und am Haus)
- ❖ Stromverbrauch der Elektromobile

In dieser Arbeit wird nur der Stromverbrauch des Hausbetriebs genauer analysiert. Wobei aber kritisch zu prüfen ist, ob nicht einige Positionen des projektspezifischen Stromverbrauchs eigentlich zum Hausbetrieb dazugehören. Zum Beispiel die Batteriebelüftung: wenn die Batterie im Haus aufgestellt wäre, könnte die Lüftungsanlage diese Aufgabe mit übernehmen. Die Laufzeit der Anlage würde sich dadurch aber verlängern, was einen höheren Stromverbrauch zur Folge hätte. Auch die Außenbeleuchtung des Schaufensters mit der darin liegenden Eingangstür zählt nicht zum Hausbetrieb. Die Außenbeleuchtung eines anderen Hauses würde wahrscheinlich weniger in Anspruch genommen werden, aber sollte dennoch nicht komplett aus dem Energieverbrauch des Hauses fallen (vgl. IBP 2013, S.14f.).

Die Messkonfiguration **Wärmeversorgung** erfasst die elektrischen und thermischen Energieflüsse innerhalb des Hauses für alle Produzenten und Verbraucher, die zur Wärmeversorgung beitragen. Abb.4-3 zeigt, an welchen technischen Komponenten welche Parameter aufgezeichnet werden. Es wird der Volumenstrom, die momentane Leistung und die Strom- bzw. Wärmemenge der letzten 24 Stunden sowie Ein- und Austrittstemperaturen erfasst. Die Speicher- und Verteilungsverluste der Anlagenkomponenten werden auch ermittelt, um die Effizienzen der eingesetzten Anlagensysteme im realen Betrieb zu bewerten (vgl. IBP 2013, S.10f.).

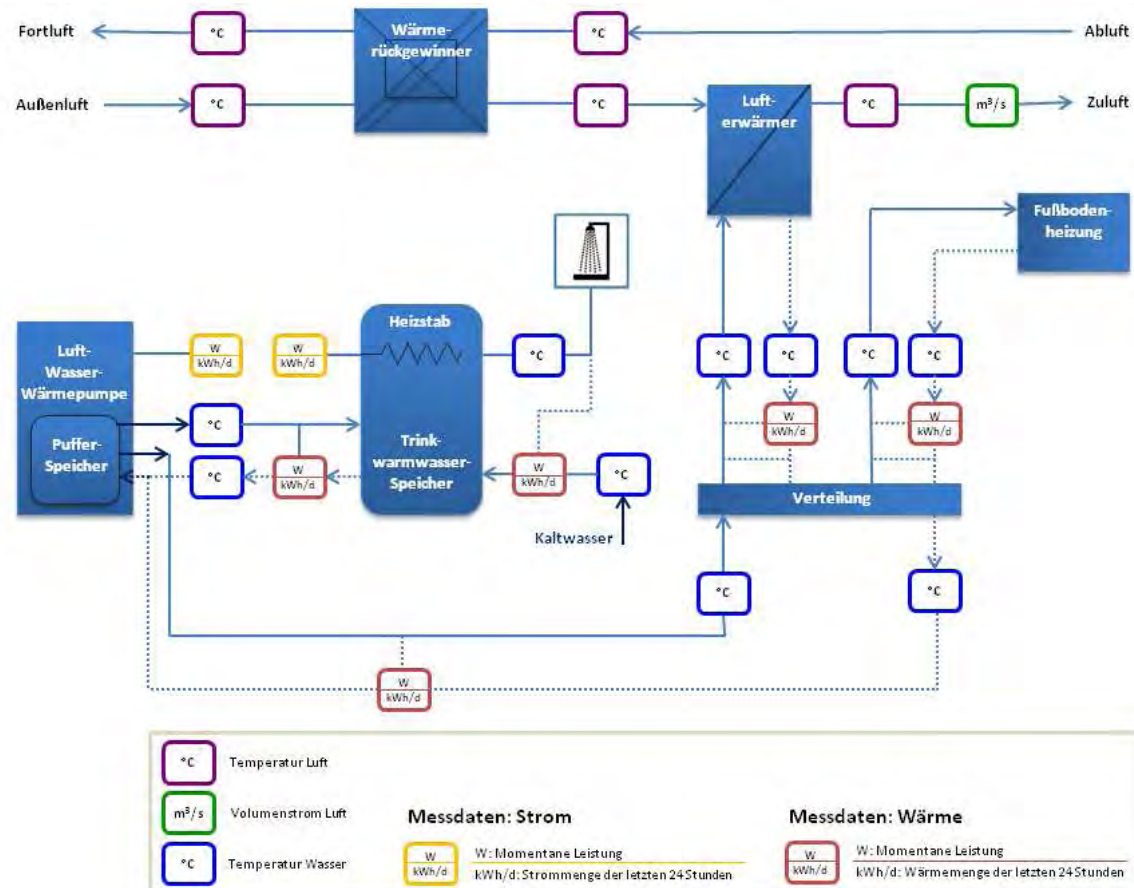


Abb.4-3 Messkonfiguration Wärmeversorgung (nach IBP 2013, S.11)

4.3 Strom

Das Bilanzkriterium des Effizienzhaus Plus ist die Primär- bzw. Endenergie, die im Haus benötigt oder produziert wird. Daher werden nachfolgend die Erzeugung und der Verbrauch der elektrischen Endenergie innerhalb der Bilanzgrenzen präsentiert und anschließend die Gewinne und Verbräuche gegenübergestellt.

4.3.1 Energieerzeugung

In Kapitel 3.4.1 wurde gezeigt, wie die elektrische Energie am Haus erzeugt wird. Im Messzeitraum beträgt die tatsächlich generierte Energie 13306 kWh und liegt damit um ca. zwanzig Prozent unter dem vorher prognostizierten Wert von 16625 kWh, siehe

Tab.4-1. Eine genauere Betrachtung der real erzeugten Energie mit einer Aufteilung zwischen Fassade und Dach ist nicht möglich, da die Daten erst seit Mitte Juli 2012 differenziert erfasst werden. Zusätzlich gab es auch noch mehrere Unterbrechungen während der Aufzeichnungen.

Tab.4-1 Vergleich zwischen vorherberechneter und tatsächlich gemessener elektrischer Energie (Quelle: IBP 2013, S.15-17 ergänzt durch Autor)

	Erzeugte Energie in kWh/a		Abweichung in %
	Berechnet	Gemessen	
PV-Dach	11.578	k.A.	-
PV-Fassade	5.047	k.A.	-
Summe	16.625	13.306	- 20,0

Der Minderertrag der PV-Anlage wird mit schlechteren klimatischen Bedingungen begründet (vgl. IBP (2013, S.17). Abb.4-4 zeigt, dass es in den Monaten Mai bis August große Unterschiede zwischen den vorher berechneten und den real gemessenen Daten gibt. Laut dem Kurzbericht des IBP's liegt das an einer geringeren Anzahl von Sonnenstunden am Standort. Im Messzeitraum soll dieser Wert in den Monaten Juni bis August um 14 % und über das gesamte Jahr um 40 % unter dem Mittel der letzten 10 Jahre gelegen haben (vgl. IBP 2013, S.11f.).

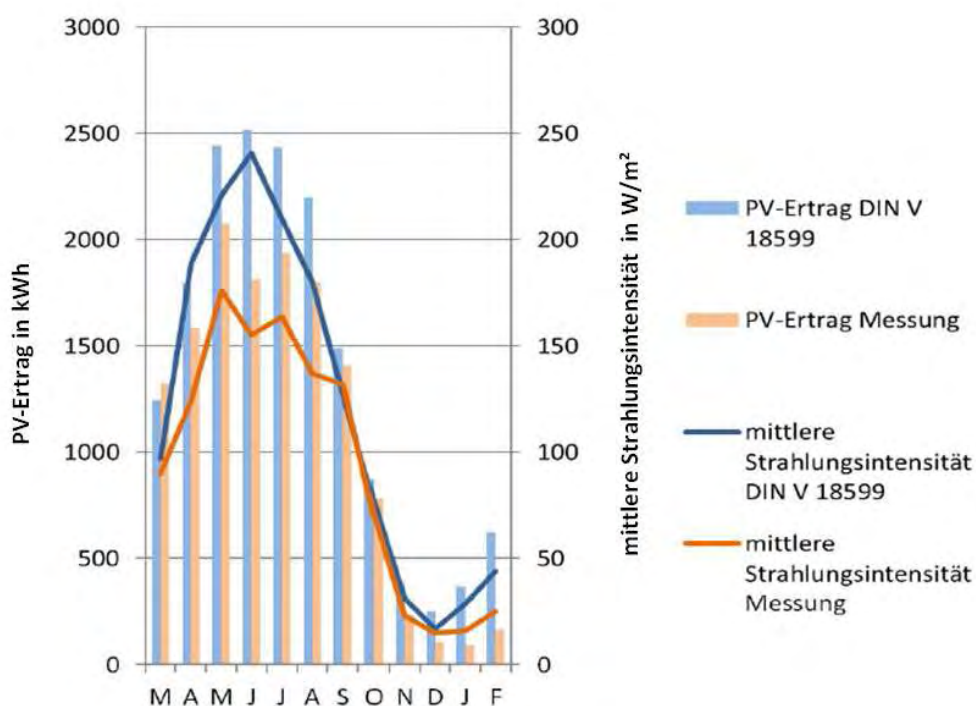


Abb.4-4 Vorberechnete und gemessene Strahlungsintensitäten und Stromerträge der PV-Anlage (Quelle: IBP 2013, S.12, ergänzt durch Autor)

In Berlin an den Standorten Tempelhof und Tegel (Entfernung von beiden Standorten zum Haus ca. 8 km) vom DWD aufgenommene Wetterdaten, bestätigen die Abweichungen der in den Monaten Juni bis August. Die Sonnenscheindauer lag um 11 % bzw. 13 % unter

dem Mittel der letzten zehn Jahre, siehe Tab.4-2. Betrachtet man nun aber die Sonnenscheindauer über den gesamten Messzeitraum, fällt dabei auf, dass die Abweichung nicht 40 % sondern nur 10 % bzw. 11 % beträgt. Die Wahrscheinlichkeit, dass derartig große Unterschiede auf diese geringe Entfernung auftreten, ist relativ gering.

Der Grund, warum diese Differenzen auftreten, wäre ohne genaueres Wissen zur Datenaufnahme nur rein spekulativ zu untersuchen. Das IBP bestätigte auf Nachfrage, dass diese Differenzen schon bekannt sind und zurzeit überprüft werden. Es gibt noch keine abschließende Aussage zu den Gründen, daher werden bei der späteren Betrachtung die Klimadaten des DWD genutzt.

Tab.4-2 Sonnenscheindauer in Berlin: Tegel und Tempelhof (Quelle: DWD)⁸

Standort	Sonnenscheindauer in h		Abweichung in %
	2002-2011	2012/2013	
Tegel	1762	1592	-10
Tempelhof	1749	1550	-11
	06.-08. (2002-2011)	06.-08. (2012/2013)	
Tegel	684	609	-11
Tempelhof	680	590	-13

4.3.2 Energieverbrauch

Die Energieverbräuche der Haustechnik innerhalb des Gebäudes werden für den Messzeitraum in Tab.4-3 mit der jeweiligen Abweichung zwischen vorherberechnetem und tatsächlich gemessenem Verbrauch gegenübergestellt.

Tab.4-3 Endenergieverbrauch 03.2012 bis 02.2013 (Quelle: IBP 2013, S.16 ergänzt durch Autor)

	Verbrauchte Endenergie in kWh/a		Abweichung in %
	Berechnet	Gemessen	
Wärmepumpe	2.217	5.865	+164,5
Hilfsenergien	2.275	3.099	+36,2
Beleuchtung	375	526	+40,3
Haushalt	2.125	2.910	+36,9
Summe	6.992	12.400	+77,3

Monatsgenau zeigt Abb.4-5 die Verbräuche über den Messzeitraum für den jeweiligen Verbraucher. Der Energieverbrauch der Wärmepumpe teilt sich noch einmal in Heizung und Trinkwarmwasserbereitung auf.

Betrachtet man die Verbraucher, fällt der hohe Energieverbrauch der Heizung in den Monaten November bis Februar auf. Die Gesamtabweichung über das Jahr beträgt mehr als das Anderthalbfache des vorherberechneten Wertes, was auf eine Fehlfunktion der Hei-

⁸ Wetterdaten im elektronischen Anhang

zung schließen lässt. Dies wird noch detaillierter in Kapitel 4.4.1 betrachtet. Die anderen Stromverbräuche sind um ca. 40 % höher als vorherberechnet, was auf zu niedrig ange-setzte Verbräuche schließen lässt, da sie im Jahresverlauf auf einem gleichen Niveau bleiben. Das Fraunhofer-IBP prüft noch, wie es zu so hohen Abweichungen zwischen vorherberechneten und gemessenen Werten kommen konnte (vgl. IBP 2013, S.17f.).

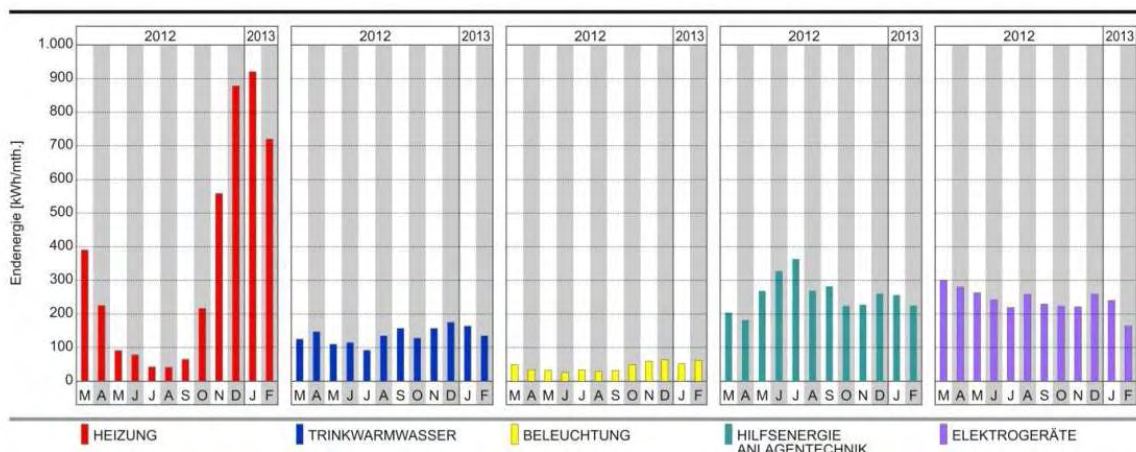


Abb.4-5 monatlicher Endenergieverbrauch (Quelle: IBP 2013, S.8)

4.3.3 Gegenüberstellung von Verbrauch und Erzeugung

Im Messzeitraum wurden 13306 kWh erzeugt, dem gegenüber steht ein Verbrauch von 12420 kWh. Daraus folgt, dass der Jahresendenergiebedarf positiv ist, wie auch die kumulierten Endenergiewerte des gebäudebezogenen Energieverbrauchs und des Energieertrags der PV-Module zeigt, Abb.4-6.

In der Messperiode wurde ein Überschuss von 906 kWh erzielt. Vergleicht man diesen Wert mit dem vorher berechneten von 9633 kWh, zeigt sich, dass weniger als zehn Prozent des prognostizierten Wertes erreicht wurden. Die Gründe hierfür sind nicht bekannt. Von den produzierten 13306 kWh, konnten im Messzeitraum 6555 kWh im Haus selbst genutzt werden, das entspricht 49,3 %. Die restlichen 6751 kWh wurden ins öffentliche Stromnetz eingespeist wie Abb.4-7 zeigt, die Energie, die wieder aus dem Netz bezogen wurden beläuft sich auf insgesamt 5800 kWh.

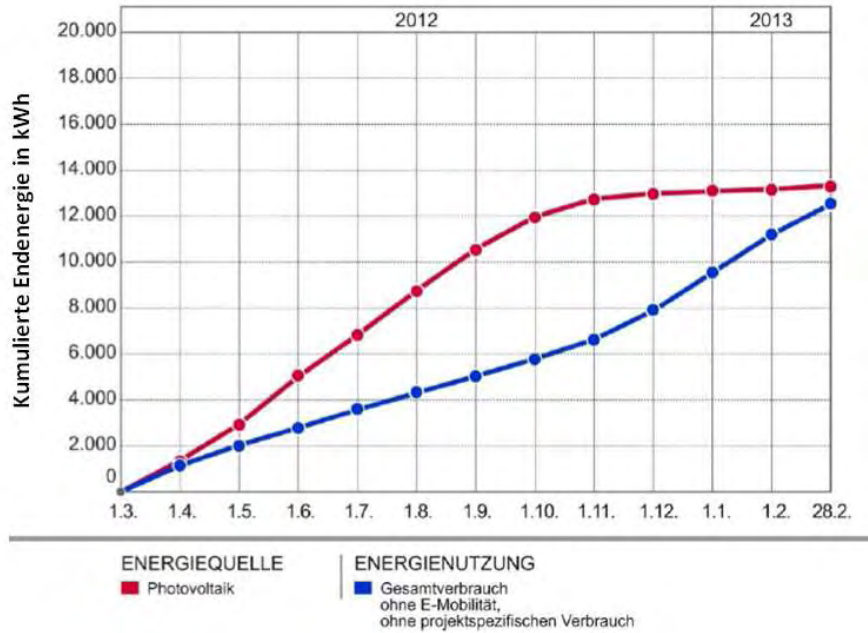


Abb.4-6 Kumulierter gebäudebezogener Energieverbrauch (rot) und Energieertrag der PV-Module (blau) im Messzeitraum (Quelle: IBP 2013, S.16, ergänzt durch Verfasser)

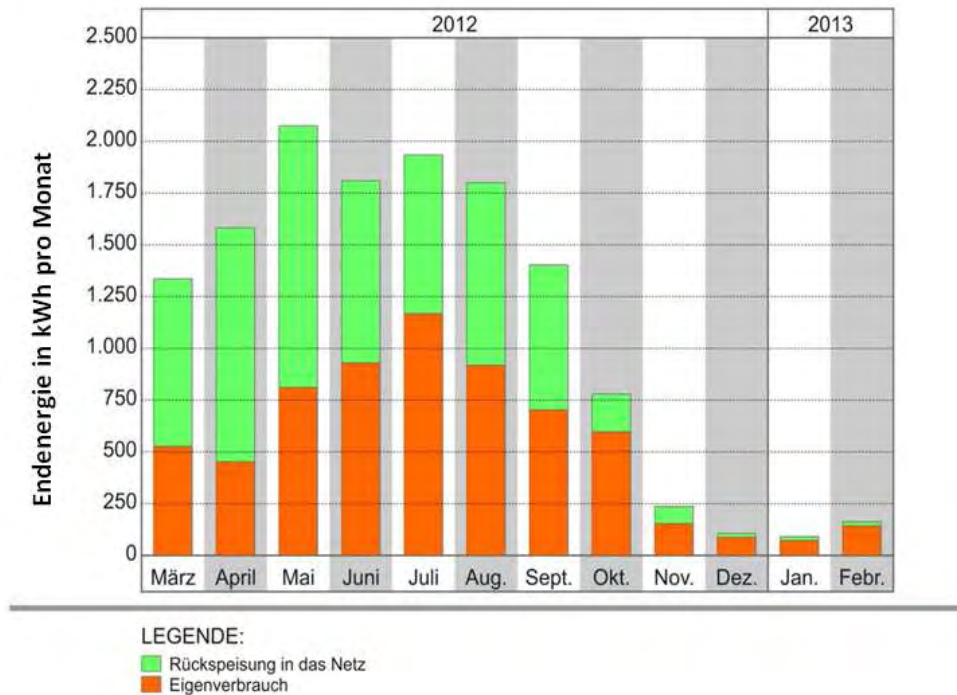


Abb.4-7 Bilanz der PV-Anlage (Quelle: BMVBS 2014, ergänzt durch Verfasser)

4.4 Wärme

4.4.1 Energieerzeugung

Die komplette Wärmeenergie im Effizienzhaus Plus erzeugt die Luft-Wasser-Wärmepumpe. Gemäß den Vorherberechnungen nach DIN V 18599 beträgt der elektri-

sche Energiebedarf der Wärmepumpe für Heizung und Warmwasserbereitung jährlich 2217 kWh. Dem gegenüber steht ein realer Verbrauch von 5865 kWh.

Die technischen Werte in Tab.4-4 beziehen sich auf die Monitoring-Daten, da es im IBP-Kurzbericht keine monatliche Auflösung gibt. Der Bedarf an elektrischer Energie ist hier um 20 kWh höher als im Kurzbericht. Die Wärmepumpe hat inklusive des Heizstabes von März 2012 bis Februar 2013 insgesamt 9372 kWh Wärmeenergie bereitgestellt. Diese Energie teilt sich auf drei Heizkreise auf: Raumluftechnik, Heizung und Warmwasserbereitung.

Tab.4-4 Vergleich thermische zu elektrischer Arbeit der Wärmepumpe im Messzeitraum (aus Monitoring-Daten im elektronischen Anhang)

Monat	thermische Energie ¹ in kWh	elektrische Energie ¹ in kWh	Arbeitszahl
März	913	533	1,7
April	524	372	1,4
Mai	177	201	0,9
Juni	149	194	0,8
Juli	48	133	0,4
August	44	176	0,2
September	99	222	0,4
Oktober	478	343	1,4
November	1276	714	1,8
Dezember	1967	1053	1,9
Januar	2023	1085	1,9
Februar	1674	857	2,0
Summe	9372	5885	1,6
¹ Daten beziehen sich auf Werte aus dem Monitoring, nicht aus dem IBP-Kurzbericht			

Gemäß VDI Richtlinie 4650 wird für die Effizienzberechnung von Wärmepumpen die Jahresarbeitszahl (JAZ) verwendet. Dabei stellt man die innerhalb eines Jahres zur Verfügung gestellte thermische Arbeit ins Verhältnis mit der benötigten elektrischen Arbeit. Falls man dieses Verhältnis für einen anderen Zeitraum betrachtet, verwendet man die Arbeitszahl β . Die JAZ beträgt für den Messzeitraum im Effizienzhaus nur 1,6, obwohl in Deutschland die JAZ für Luft-Wasser-Wärmepumpen meist in einem Bereich von 3 bis 4,5 liegen. Laut des EEWärmeG muss die Jahresarbeitszahl bei neu errichteten Wärmepumpen größer als 3,3 sein (vgl. EEWärmeG 2009, § 20, III, b).

$$\beta = \frac{Q_H}{W_{el}} \quad (4.1)$$

Die schlechte energetische Effizienz der Wärmepumpe, ist wie Abb.4-8 zeigt, nicht auf klimatische Bedingungen zurückzuführen, denn der gemessene Heizenergieverbrauch ist gegenüber einem Durchschnittsjahr als eher zu niedrig einzustufen. Der Referatsleiter des

Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) erklärt die schlechte Effizienz mit einer nicht normgerechten Nutzung der Heizung. Die EnEV geht von einer Temperatur in allen Räumen aus. Die Temperatur im Obergeschoss wurde aber von den Bewohnern niedriger eingestellt als die im Erdgeschoss und durch die offene Bauweise des Hauses ist die warme Luft dann über das Treppenhaus nach oben gestiegen. Die Folge war, dass sich im Obergeschoss eine höhere Temperatur ergeben hat, als eingestellt. Infolgedessen blieb die Heizung im Obergeschoss ungenutzt und die Heizung im Erdgeschoss musste den gesamten Wärmeeintrag ins Haus übernehmen. Dies verursachte eine höhere Vorlauftemperatur, welche sich negativ auf die Leistungszahl ϵ auswirkt und dadurch die Effizienz der Wärmepumpe verringert hat.

Neben dem aktiven Energieeintrag in das Gebäude durch die Wärmepumpe kommen noch passive Gewinne hinzu, wie z.B. die abgegebene Wärme von Personen, der Beleuchtung und anderer technischer Geräte innerhalb des Gebäudes sowie solarer Einträge über Fenster und die Gebäudehülle. Für die spätere Betrachtung wird nur der aktive Energieeintrag verwendet, da sich der passive Energieeintrag bei Einhaltung aller Dämmvorschriften nur geringfügig ändert. Falls es zu größeren passiven Wärmeeinträgen wie z.B. durch einen größeren Warmwasserspeicher oder ähnlichem kommt, wird darauf in den einzelnen Kapiteln eingegangen.

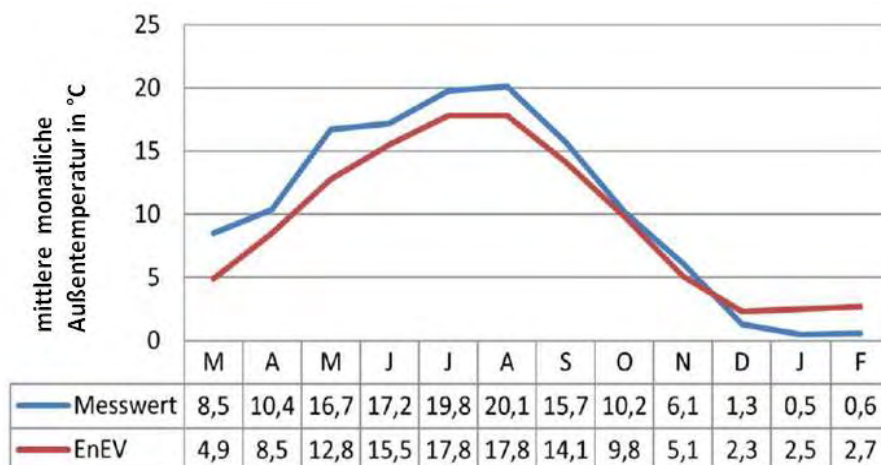


Abb.4-8 Gemessene und vorherberechnete Außenlufttemperatur im Messzeitraum 03.2012 - 02.2013 (Quelle: IBP 2013, S.12, ergänzt durch Verfasser)

4.4.2 Energieverluste

Wenn die Außentemperatur unter der Innentemperatur liegt, treten Wärmeverluste bei Transmission durch die Außenhülle auf. Um diese genau zu erfassen, müssen an verschiedenen Stellen des Hauses die Temperaturdifferenz und der Wärmefluss durch die Außenhülle erfasst werden. Dies fand zwar im Haus statt, ist aber nicht Teil dieser Arbeit. Da die Daten aus dieser Auswertung nicht vorliegen, wird zur Betrachtung der Wärmeverluste die bereitgestellte thermische Energie der Wärmepumpe verwendet. Die thermischen Verluste ändern sich nur geringfügig, wenn alle dämmtechnischen Maßnahmen bezüglich der Durchdringung der Außenhülle beachtet werden, egal welche Techniken zur

Energieproduktion oder -speicherung gewählt werden. Je höher die Wärmeverluste durch die Außenhülle, desto mehr Energie muss die Wärmepumpe bereitstellen, um eine kontinuierliche Raumtemperatur zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde versucht, die Wärmeverluste innerhalb des Gebäudes zu minimieren, indem man kurze Leitungswege vom Wärmeerzeuger zu den Nutzern realisiert hat.

5 Maßnahmen zur Optimierung der Produktion

Die Energiebilanz des Hauses mit dem Zusammenwirken und der Höhe der unterschiedlichen Energieströme im Haus wurde definiert. Um die Produktion der Energie zu optimieren, wird ein Überblick über verschiedene Technologien mit ihren jeweiligen Eigenschaften gegeben und anschließend ein Zwischenfazit gegeben. In Kapitel 7 werden dann die ausgewählten Technologien zu einem Gesamtkonzept zusammengesetzt. Die Kosten für die Optimierung werden nur nachrangig betrachtet.

5.1 Technologien zur Stromerzeugung

In diesem Kapitel werden verschiedene Technologien zur Stromerzeugung vorgestellt, kurz beschrieben und abschließend bewertet. Es wird versucht, mit den verschiedenen Technologien den größtmöglichen Ertrag zu erwirtschaften.

Die in Kapitel 5.2.4 aufgeführten Mikro-KWK-Anlagen können auch zu den Stromproduzenten gezählt werden, da sie aber nach der Wärmebereitstellung ausgelegt werden, sind sie den Wärmeproduzenten zugeordnet.

5.1.1 Vergleich und Auswahl der PV-Module

Nachfolgend werden verschiedene Photovoltaik-Zelltypen miteinander verglichen, um die am besten geeigneten PV-Module für das neue Energiekonzept auszuwählen. Es werden dabei nicht alle am Markt verfügbaren Solarzellen vorgestellt. Die Auswahl bezieht sich nur auf Zellen, die auch in einschlägiger Fachliteratur Verwendung finden. Solarzellen, welche nicht in großtechnischer Produktion gefertigt werden, wie z.B. Farbstoffsolarzellen oder Konzentratorzellen, werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Die wichtigsten Eigenschaften, sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Zellen werden genannt, ohne dabei detailliert auf die physikalischen Zusammenhänge einzugehen. Hier wird auf weiterführende Literatur verwiesen, zum Beispiel: Mertens (2013). Betrachtet werden:

- ❖ Monokristalline Siliziumzellen
- ❖ Multikristalline Siliziumzellen
- ❖ Amorphe Siliziumzellen
- ❖ Monokristallin-Amorphe Siliziumzellen (HIT-Zelle)
- ❖ Mikrokristallin-Amorphe Siliziumzellen (Mikromorphe Siliziumzellen)
- ❖ Cadmium-Tellurid Solarzellen (CdTe-Zellen)
- ❖ Kupfer-Indium-Diselenid Solarzellen (CIS-Zellen)

In Tab.5-1 werden die besten Wirkungsgrade für Solarzellen in Laborversuchen und aus der Produktion von PV-Modulen genannt. Der Vergleich über den Wirkungsgrad wird gewählt, da er das Verhältnis der nutzbaren Energie zur zugeführten Energie bezeichnet, welches eines der wichtigsten Kriterien einer Solarzelle ist.

Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die Bandlücke, zwischen dem Leitungs- und Valenzband, da sich aus ihr der theoretische Wirkungsgrad einer Solarzelle ergibt und damit ihr Entwicklungspotential, siehe Abb.5-1. Den maximalen Wirkungsgrad von 30 % erreicht man bei einer Bandlückenenergie von 1,38 eV.

Aufgrund von Prozessen innerhalb der Solarzellen, wie z.B. Degradation, ist es für die Langzeitstabilität der Solarmodule über ihre gesamte Lebensdauer wichtig, welche Erfahrungen man mit den unterschiedlichen Technologien hat. Hier haben Siliziumzellen einen Vorteil. Zusätzlich wird der Temperaturkoeffizient von handelsüblichen PV-Modulen angegeben. Er beschreibt den Leistungsverlust aufgrund von Erwärmung und bezieht sich auf eine Temperatur von 25°C (vgl. Quaschnig 2009, S.1 89f.).

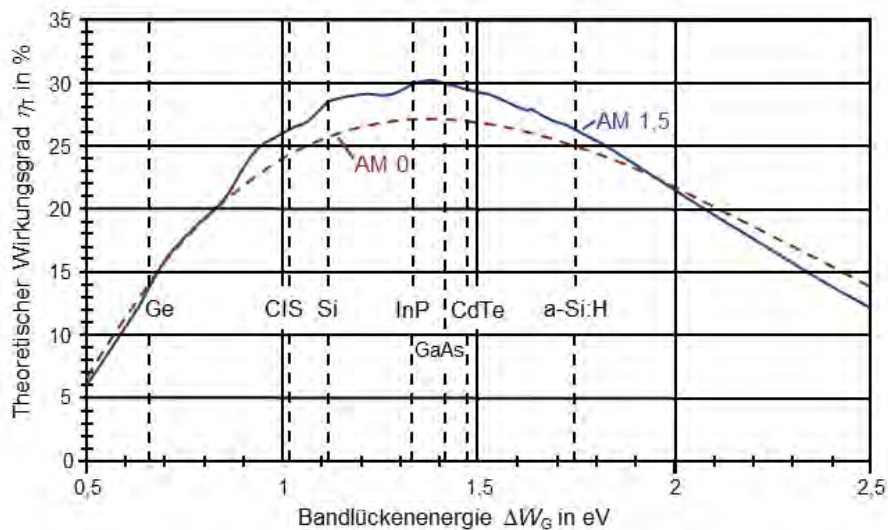


Abb.5-1 Theoretischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Bandabstandes (Quelle: Konrad Mertens, S.106)

Tab.5-1 Gegenüberstellung verschiedener Photovoltaik-Zelltypen (Quelle: Quaschnig 2013, S.170-255 / Kaltschmitt 2013, S.353-450)

Zelltechnologie	Effizienz [%]		Band- lücke	Temperatur- koeffizient [%/K]	Schicht- dicke [μm]	Besonderheiten/ Einsatzbereich
	η_{Labor}	η_{Modul}				
1. Monokristalline Siliziumzellen	25,0 %	16-20 %	1,1 eV	-(0,32-0,51) %/K	150-200 μm	+ Lebensdauer über 30 Jahre mit guter Langzeitstabilität + Unbegrenzte Verfügbarkeit - Schlechtes Schwachlichtverhalten - zusätzl. Maßnahmen bei Teilverschattung (Bypassdiode)
2. Multikristalline Siliziumzellen	20,4 %	15-17 %	1,1 eV	-(0,32-0,51) %/K	150-200 μm	+ gute Langzeitstabilität + unbegrenzte Verfügbarkeit + akzeptable Energierücklaufzeiten
3. Amorphe Siliziumzellen: o Single-Zellen o Tandem-Zellen o Triple-Zellen	10,1 % 10,7 % 13,1 %	7 % 8 % 8,2 %	1,8 eV	-(0,18-0,23) %/K	0,5 μm	+ gutes Schwachlichtverhalten + geringe Dicke und Gewicht + integrierte Serienschaltung - starke Degradation (30%) während der ersten Betriebsmonate
4. HIT-Zellen	23,0 %	19 %	k.A.	-(0,23-0,30) %/K	200 μm	+ größerer Bereich des Sonnenspektrums nutzbar + hohes Steigerungspotential - wenig Erfahrung bzgl. Langzeitstabilität
5. Mikromorphe-Siliziumzellen	12,1 %	10 %	k.A.	-0,24 %/K	1-3 μm	+ größerer Bereich des Sonnenspektrums nutzbar + Steigerungspotential + kaum Degradation - wenig Erfahrung bzgl. Langzeitstabilität
6. CdTe-Zellen	16,7 %	11 %	1,4 eV	-(0,18-0,25) %/K	5-10 μm	+ Steigerungspotential + Gutes Schwachlichtverhalten - wenig Erfahrung bzgl. Langzeitverhalten - Verfügbarkeitsproblem - Imageproblem (Schwermetall)
7. CIS-Zellen	19,4 %	13 %	1 – 1,7 eV	-(0,35-0,5) %/K	1,5 μm	+ gutes Schwachlichtverhalten - Verfügbarkeitsproblem

Zwischenfazit

In Tab.5-1 werden die verschiedenen PV-Technologien miteinander verglichen. Bei der Auswahl für das optimierte Energiekonzept muss man zwischen den PV-Modulen auf dem Dach und denen an der Fassade unterscheiden, da dort unterschiedliche Direkt- und Diffuslichtanteile auftreten. Die Miteinbeziehung der Ausrichtung der PV-Module findet in Kapitel 7 statt.

Für das Dach eignen sich Module mit einer hohen Effizienz, welche sich gut für die Umwandlung direkter Solarstrahlung eignen. Mit ihnen kann man den höchsten Ertrag pro Fläche produzieren. Hierfür eignen sich monokristalline oder HIT-Zellen gut, da beide einen Wirkungsgrad von ca. 20 % aufweisen. Die HIT-Zellen besitzen zwar einen um ein Prozent geringeren Wirkungsgrad, weisen aber einen besseren Temperaturkoeffizienten auf. Dies ist ein Vorteil, da im Betrieb die Zelltemperatur durchaus 60°C betragen kann (vgl. Mertens 2013, S.97). Geht man von einem Verlust von 2,7 % (HIT) und 4,2 % (mono) pro 10 K Temperaturerhöhung aus, bedeutet dies einen Unterschied von 9 % zwischen beiden Modultypen. Folgerichtig werden daher im neuen Konzept die HIT-Zellen auf dem Dach favorisiert.

Bei der Fassade sollte man eine Zell-Technologie nutzen, welche mit einem großen Diffuslichtanteil noch gute Erträge produziert. Hier wären vor allem CdTe- und CIS-Module zu nennen, die besten Module unterscheiden sich im Wirkungsgrad um 2 Prozent. Vergleicht man nun die Module über den Temperaturkoeffizienten analog zu den Dach-Modulen und geht dabei von einem Temperaturkoeffizienten von 2,2 % (CdTe) und 4,3 % (CIS) pro 10 K Temperaturerhöhung aus, beträgt die Differenz 12,6 % bei 60°C. Aus diesem Grund wird das neue Energiekonzept mit CdTe-Modulen geplant.

5.1.2 Nutzung von Windenergie

Es bedarf vorher genauer Messungen der Windverhältnisse zur Planung einer Kleinwindenergieanlage (KWEA) und dies über einen längeren Zeitraum. Da für den Standort des EHP's keine genauen Windgutachten oder Ertragsprognosen vorliegen, kann nur eine grobe Standortanalyse durchgeführt werden.

Nimmt man die Daten vom Deutschen Wetterdienst, wird der Jahresmittelwert 10 m über dem Grund mit etwa 2 m/s angegeben. Die meisten Anlagen laufen aber erst bei 2,5 bis 3 m/s an, da in langsamerem Wind kaum Energie vorhanden ist. Hinzu kommt, dass eine KWEA in Hauptwindrichtung frei von Windschatten durch Hindernisse wie Gebäude, Bäume oder ähnlichem sein sollte. Diese Bodenrauigkeit bremst den Wind und verursacht Turbulenzen, was zu erheblichen Leistungseinbußen führt. Die Hauptwindrichtung ist West mit 21 % aller Stunden, gefolgt von Südwest mit 16 % (vgl. Berlin 2014a). Gemessen wurden diese Werte am ehemaligen Flughafen-Tempelhof, ungefähr 8 km vom Effizienzhaus Plus entfernt. Betrachtet man nun das EHP, ist das Grundstück mit Ausnahme der Fasanenstraße, die hier von SSW nach NNO verläuft, von großen Gebäuden um-

geschlossen. Das bedeutet, dass der Wind nur aus diesen beiden Richtungen eine KWEA frei anströmen könnte. Wind aus Richtung Nord oder Nordost kommt aber nur selten vor.

Allein aus den Winddaten des DWD und einer groben Standortanalyse scheint ein rentables Aufstellen einer KWEA schon recht unwahrscheinlich. Hinzu kommt, dass grob aufgelöste regionale Daten aus Windatlanten oder Winddatenbanken nicht ausreichen, um sich darauf bei der Planung von KWEA zu stützen. Dies belegt eine britische Studie, beim „Warwick Wind Trials Project“⁹ wurden 26 KWEA verschiedener Hersteller an unterschiedlichen Standorten in Großbritannien untersucht. Die Mikrowindanlagen sind allesamt auf Dächern montiert, wobei unterschiedliche Standorte betrachtet wurden. Die Autoren stellen fest, dass Aufdach-KWEA die wohl komplizierteste Art der Windenergieerzeugung sind. Die Studie kann zwar nur bedingt für am Gebäude aufgestellte KWEA adaptiert werden, zeigt aber das Ausmaß der Einbußen auf, welche bei realen Kleinwindanlagen, im Gegensatz zur vorherigen Prognose, auftreten.

Das Ergebnis der Auswertung der britischen Studie zeigt, dass alle Windgeschwindigkeiten unter denen der einfachen Prognosen liegen. Bei wenigen befindet sich die Differenz im einstelligen Prozentbereich. Auf 16 von 26 Dächern unterschreiten die realen Werte die Prognosen um über 40 Prozent, teilweise sogar über 60 Prozent. Die Leistungskurven würden teilweise um zwei Drittel höhere Erträge vermuten lassen, als die Anlagen real produziert haben. Bei einigen reichte der Ertrag noch nicht einmal aus, um den Eigenverbrauch der Elektronik und der Wechselrichter zu decken. Außerdem mussten fünf Anlagen auf windhöffigen Dächern abgeschaltet werden, weil sich Mieter über den Lärm beschwert haben.

Anstatt eine KWEA auf dem Dach zu montieren, ließe sich diese auf einem Mast neben dem Gebäude aufstellen. Dies wäre laut der Bewertungsgrundlagen des Effizienzhauses zulässig, wobei sich aber weitere Probleme ergeben. Erreicht die KWEA eine Höhe von bis zu 10 m, bringt dies nur einen geringen Zugewinn an Leistung, da immer noch mehrere Hindernisse die Anlage beeinträchtigen. Man könnte die Anlage so aufstellen, dass sie die anderen Gebäude überragt und somit nicht mehr in ihrem Windschatten steht. Aufgrund höherer Windgeschwindigkeiten und weniger Turbulenzen wäre dies sinnvoll. Soll eine Anlage aber über zehn Meter hoch werden, braucht man in Deutschland generell eine Baugenehmigung. Neben dieser sind eventuell noch Genehmigungen von anderen Fachbehörden einzuholen, z.B. der Unteren Immissions-, Natur-, Umwelt-, und Denkmalschutzbehörde. Einige Punkte, die dabei zu prüfen sind:

- ❖ Widerspricht das Vorhaben dem Landschaftsplan?
- ❖ Liegen die Lärmimmissionen innerhalb der Grenzwerte?
- ❖ Beeinträchtigt der Schattenwurf Nachbarn oder Verkehrsteilnehmer?
- ❖ Liegt ein Eingriff in Natur und Landschaft vor?
- ❖ Werden Naturschutzgebiete und/oder geschützte Tierarten gestört?

⁹ Siehe auch: www.warwickwindtrials.org.uk/2.html

❖ Steht die Anlage in der Nähe eines Baudenkmals und in Konflikt zu diesem?

Zwischenfazit

Abschließend kann festgestellt werden, dass es sich für diesen Standort nicht lohnt, Windkraft zur Energieversorgung zu nutzen. Die Windgeschwindigkeit liegt laut der grob aufgelösten Winddaten bei circa 2 m/s. Hinzu kommen die Verwirbelungen im Stadtgebiet durch Hindernisse, Strömungen und Aufwinde, welche den Wind abschwächen.

Die Anschaffungskosten würden zusammen mit den laufenden Kosten einen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb an diesem Standort nicht möglich machen. Hinzu kommt die problematische architektonische und technische Integration bezüglich Ästhetik, Geräuschemissionen und anderer oben genannter Faktoren.

Es wäre sinnvoller, das Geld in andere Technologien zur Versorgung des Gebäudes zu investieren. Windenergie sollte aber nicht kategorisch als Versorgungsquelle für Gebäude ausgeschlossen werden. An windhöffigeren Standorten kann es sich durchaus lohnen, eine oder mehrere Kleinwindenergieanlagen zu betreiben.

5.2 Technologien zur Wärmeproduktion

In diesem Kapitel werden verschiedene Technologien zur Wärmeproduktion vorgestellt, beschrieben und anschließend bewertet.

5.2.1 Wärmepumpe

Zunächst muss man bedenken, dass mit einer Wärmepumpe nur dann klimaneutrale Wärmeenergie gewonnen werden kann, wenn ihre Antriebsenergie regenerativ erzeugt wird. Auf den Messzeitraum bezogen, ist diese Voraussetzung im Berliner Effizienzhaus Plus gegeben.

Wärmepumpen lassen sich generell in drei unterschiedliche Funktionsprinzipien unterscheiden: Kompressions-, Absorptions- und Adsorptions-Wärmepumpen (vgl. Quaschnig 2013, S.339). In dieser Arbeit werden nur elektrische Kompressionswärmepumpen betrachtet, da diese den größten Marktanteil ausmachen und alle anderen Anlagentypen für diesen Anwendungsfall kaum Bedeutung erlangt haben. Das allgemeine Funktionsprinzip einer Kompressionswärmepumpe zeigt Abb.5-2.

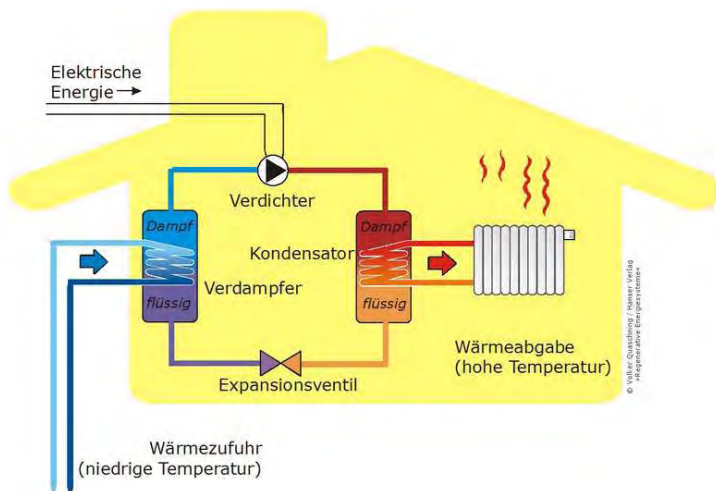


Abb.5-2 Prinzip der Kompressionswärmepumpe (Quelle: Quaschnig 2009, S.320)

Es erfolgt die Wärmezufuhr aus einer Niedertemperaturquelle, welche thermische Energie in einem Verdampfer an ein Kältemittel abgibt. Dieses Kältemittel hat einen niedrigen Siedepunkt und verdampft. Danach wird der Dampf mit einer elektrisch angetriebenen Pumpe verdichtet, wodurch zusätzliche Wärme produziert wird. Diese Nutzwärme kann dann im Kondensator an den Heizkreis abgegeben werden. Das Kältemittel verflüssigt sich wieder, wird entspannt und der Kreislauf beginnt von neuem. Für diesen Prozess gilt: Je geringer der Temperaturunterschied zwischen Wärmezufuhr und Wärmeabgabe ist, desto weniger elektrische Energie benötigt die Wärmepumpe. Auf das genauere Funktionsprinzip wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, sondern es wird auf Fachliteratur verwiesen z.B. Kaltschmitt (2013, S.621 ff.). Die beschriebene Kompressionswärmepumpe kann man zusätzlich nach der zu nutzenden Wärmequelle unterscheiden, hier sind das Umgebungsluft und oberflächennahe Erdwärme.

Die Umgebungsluft wird nur von der einstrahlenden Sonne aufgewärmt, bei der oberflächennahen Geothermie stammt ein Großteil der im Boden eingespeicherten Energie auch aus direkter Sonneneinstrahlung oder indirekt über aufgewärmtes Regen- oder Grundwasser. Ein kleiner Teil stammt mit zunehmender Tiefe auch vom geothermischen Wärmefluss der Erde. Eine Abgrenzung zur Tiefengeothermie, welche die Erdwärme in größeren Tiefen nutzt, ist jedoch nicht klar definiert. In Deutschland wird aber häufig eine Tiefe von einhundert Metern gewählt, da ab dieser Tiefe das Bundesbergbaurecht greift. Diese Definition findet auch hier Verwendung. Nachfolgend werden drei verschiedene Wärmepumpenanlagen beschrieben, miteinander verglichen und anschließend bewertet. Man unterteilt Wärmepumpen nach der von ihr genutzten Wärmequelle in:

- ❖ Umgebungsluft (Luft/Wasser)
- ❖ Grund- und Oberflächenwasser (Wasser/Wasser)
- ❖ Erdreich, Erdwärmekollektor, Erdwärmesonde (Sole/Wasser)

Die Auflistung zeigt die jeweiligen Wärmequellen mit ihren zugeführten und abgeführten Wärmemedien. Um die Effizienz einer Wärmepumpe zu beschreiben, bietet sich die Jah-

resarbeitszahl an, siehe auch Kapitel 4.4. Dieses Verhältnis zwischen eingesetzter zu bereitgestellter Energie zeigt, wie effizient eine Wärmepumpe im tages- und jahreszeitlichen Wechsel arbeitet. Dieses Verhältnis ist besser zur Beurteilung geeignet als die Leistungszahl einer Wärmepumpe, da diese nur für bestimmte Betriebszustände gilt. Die JAZ ist aber nur bei klar definierten Systemgrenzen untereinander vergleichbar. Zusätzlich zur Antriebsarbeit des Verdichters werden auch periphere, der Wärmepumpe zugehörige Komponenten wie Steuerung, Regelung, Ventilatoren und Pumpen sowie Verluste durch den instationären Betrieb berücksichtigt (vgl. Kaltschmitt et al. 2013, S.635). Maßgeblich für hohe Jahresarbeitszahlen sind eine richtige Dimensionierung und eine möglichst niedrige Vorlauftemperatur. Die durchschnittlichen Jahresarbeitszahlen, die Tab.5-2 zeigt, stammen aus einem Feldtest im Schwarzwald. Dieser Test zeigt, dass Wärmepumpen, die ihre Energie aus dem Erdreich beziehen, am besten abschneiden. Die Wasser/Wasser Wärmepumpen waren etwas ineffizienter, da sie einen etwas größeren Energieaufwand für die Pumpen haben. Am schlechtesten schnitten die Luft/Wasser Wärmepumpen ab, da sie in der Heizperiode aufgrund der geringen Außentemperaturen den größten Temperaturhub machen müssen.

Tab.5-2 Gegenüberstellung von Wärmepumpen mit verschiedenen Wärmequellen (vgl. Quaschnig 2013, S.339-343 / Kaltschmitt 2013, S.621-691)

Wärmepumpe	JAZ	Eigenschaften	Anforderungen/potentielle Probleme
Luft/Wasser	3,0	<ul style="list-style-type: none"> - Luft als Wärmequelle überall vorhanden - deckt breites Temperaturspektrum ab 	<ul style="list-style-type: none"> - unterliegt tages- und jahreszeitlichen Temperaturunterschieden - große Fördervolumen durch geringe spezifische Wärmekapazität der Luft (dadurch auch akustische Probleme) - hoher apparativer Aufwand durch schwankende Außentemperaturen - große Divergenz zwischen Außentemperatur und Heizwärmenachfrage (hohe Nachfrage bei niedrigen Temperaturen), dadurch sinkende Effizienz - bei niedrigen Temperaturen (0-6°C) muss Wärmetauscher periodisch abgetaut werden, dadurch entstehen Heizleistungsverluste
Wasser/Wasser	3,4	<ul style="list-style-type: none"> - Grundwasser eignet sich gut als Wärmequelle (konstantes Temperaturniveau) - theoretisch aktive Kühlung im Sommer möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - wasserrechtliche Probleme/ Wasserrichtlinien müssen eingehalten werden (Wärmeeintrag in den Boden, Wasserentnahme, etc.) - limitierte Grundwasserleiter in ausreichender Qualität und Tiefe - Temperaturdifferenz zwischen Entnahme und Rückspeisung max. 6 K - evtl. Wasseraufbereitung o.Ä. aufgrund von Ausfällung von im Wasser gelöster Ionen
Sole/Wasser (Erdwärmekollektoren; -sonden)	3,6	<ul style="list-style-type: none"> - theoretisch aktive Kühlung im Sommer möglich - geschlossenes System, d.h. keine wasserrechtlichen und Grundwasserprobleme <p><i>Erdwärmesonden:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - benötigen weniger Fläche als Kollektoren durch vertikale Einbringung 	<ul style="list-style-type: none"> - potentielle Unterdimensionierung bei falscher Auslegung, dadurch Verschlechterung der Effizienz <p><i>Erdwärmekollektoren:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - große Fläche notwendig, um Kollektoren im Erdboden zu verlegen - Boden über den Kollektoren darf nicht überbaut oder versiegelt sein - unterliegen größerem klimatischen Einfluss als Erdwärmesonden <p><i>Erdwärmesonden:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - spezifische Entzugsleistung ist stark abhängig von Bodenbeschaffenheit und Nutzungsdauer - Gefahrenpotential durch Bohrarbeiten zur Verlegung der Sonden (z.B. Kontamination des Grundwassers, Hebungen oder Senkungen des Bodens)

Zwischenfazit

Im Vergleich zeigt sich, die effizienteste Wärmepumpe nutzt Erdwärmekollektoren oder -sonden. Erdwärmekollektoren werden zwar unterhalb der Frostgrenze in 1-2 Metern unter der Erdoberfläche verlegt, unterliegen damit im Jahreswechsel aber immer noch größeren Temperaturschwankungen als Erdwärmesonden. Folglich wird aus diesem Grund im neuen Energiekonzept eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonden favorisiert. Diese können bei richtiger Dimensionierung über das ganze Jahr dem Erdboden annähernd die gleiche Wärmeleistung entziehen. Ein besonderes Augenmerk muss aber auf die Bohrarbeiten gerichtet werden, da hier gewisse Risiken bestehen. Es kann zum Beispiel zu Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche kommen oder es können zwei oder mehrere Grundwasserleiter miteinander verbunden werden. Bei einer fachmännischen Ausführung der Arbeiten ist dieses Risiko aber minimal. Eine Gefahr von Erdbeben, wie bei der Tiefengeothermie möglich, geht bei diesem Verfahren nicht aus.

5.2.2 Solarthermie

Solarthermische Wärmeerzeugern wandeln die Sonnenenergie in nutzbare Wärme um und machen sie im Haus verwendbar. Im bisherigen Konzept kam diese Art der Wärmeerzeugung nicht zum Einsatz, obwohl sie zur Warmwasserbereitung und/oder zum Beheizen des Hauses genutzt werden kann, ohne dafür elektrische Energie zu benötigen. Lediglich die Zirkulationspumpe/n verbrauchen Strom. Der Sonnenkollektor sollte so aufgestellt werden, dass er möglichst viel Sonnenstrahlung aufnehmen kann. Hierfür empfiehlt sich das Dach mit einer südorientierten Ausrichtung des Kollektors.

Unter Berücksichtigung der im Haus vorliegenden Bedingungen (wechselnde Außentemperaturen im Jahresverlauf, benötigte Wärmebereitstellung, etc.), werden zwei verschiedene und den Anforderungen entsprechende Kollektortypen miteinander verglichen. Sie sollen im neuen Energiekonzept sechzig Prozent zur Warmwasserversorgung beitragen, da hier höhere Temperaturen als bei der Heizungsnutzung benötigt werden. Für diese hohen Temperaturen (mindestens 45°C) eignen sich am besten Flach- und Vakuumröhrenkollektoren, da sie nur geringe Wärmeverluste aufweisen. Diese Kollektoren gibt es in verschiedenen Ausführungen bezüglich ihrer Absorber und Abdeckungen (vgl. Kaltschmitt (2013, S.191-194). Betrachtet werden ein Flachkollektor mit selektivem Absorber und einfacher Abdeckung und ein Vakuumröhrenkollektor.

Tab.5-3 Typische Kollektorkennwerte (nach Kaltschmitt 2013, S.201)

Kollektortyp	Optischer Wirkungsgrad ¹	Thermischer Verlustfaktor ¹ in W/(m ² K)	Typischer Temperaturbereich ² in °C
Flach	0,75 - 0,81	3,0 - 4,0	20 - 80
Vakuumröhren	0,45 - 0,80	0,6 - 1,2	50 - 120
¹ bezogen auf die Bruttokollektorfläche ² mittlere Arbeitstemperatur			

Zwischenfazit

Der Flachkollektor besitzt einen höheren optischen Wirkungsgrad, wie Tab.5-3 zeigt. Dieser beschreibt den Wirkungsgrad des Kollektors ohne thermische Verluste aufgrund von Konvektion oder Wärmestrahlung. Er weist aber auch größere thermische Verluste als ein Vakuumröhrenkollektor auf und kann nur geringere Temperaturen erzeugen. Die niedrigeren Temperaturen sind für die geplante Anwendung weniger bedeutend, aber der Wärmeverlust, gerade bei großen Temperaturdifferenzen zwischen Kollektor und Außentemperaturen sollte möglichst gering sein. Abb.5-3 zeigt den Kollektorwirkungsgrad bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen Kollektor (ϑ_K) und Umgebung (ϑ_U). Es zeigt sich, dass der Vakuumröhrenkollektor bei Temperaturdifferenzen größer 0°C höhere Kollektorwirkungsgrade aufweist als der Flachkollektor.

Abschließend kann festgestellt werden, dass sich für die Anwendung am Effizienzhaus Plus Vakuumröhrenkollektoren besser eignen. Sie sollen im neuen Energiekonzept vorrangig zur Unterstützung der Warmwasserversorgung genutzt werden. Vakuumröhrenkollektoren ermöglichen gute Kollektorwirkungsgrade bei niedrigen Außentemperaturen oder hohen Nutzttemperaturen (vgl. Quaschnig 2013, S.115). Der Kollektorpreis ist jedoch höher als der von Flachkollektoren (vgl. Quaschnig 2013, S.110). Anzumerken ist noch, dass für einen sinnvollen Gebrauch ein Wärmespeicher benötigt wird, da das Volumen innerhalb der Kollektoren sehr gering ist. Dieser speichert die Wärmeenergie zwischen und stellt sie bei Bedarf wieder zur Verfügung.

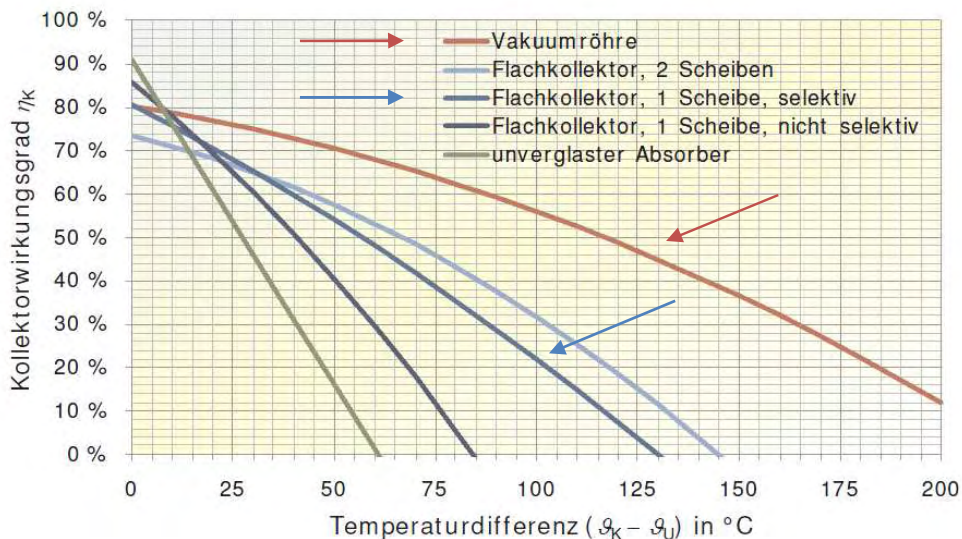


Abb.5-3 Kollektorwirkungsgrade η_K über der Temperaturdifferenz $\vartheta_K - \vartheta_U$ für verschiedene Kollektortypen bei einer Bestrahlungsstärke von 800 W/m^2 (Quelle: Quaschnig 2013, S.116, ergänzt durch Autor)

5.2.3 Wärmeerzeuger mit biogenen Brennstoffen

Auf eine Betrachtung der Erzeugung von Wärme, durch das Verbrennen biogener Brennstoffen wird in dieser Arbeit verzichtet. Es gibt bei der Nutzung dieser Brennstoffe mehre-

re Bedenken. Eigentlich entsteht bei der Verbrennung von Biomasse nur so viel Kohlendioxid, wie die Pflanzen vorher im Wachstum gebunden haben, allerdings wird beim Transport und einer eventuellen Weiterverarbeitung mit meist fossilen Brennstoffen noch zusätzliches Kohlendioxid freigesetzt. Neben Kohlendioxid entstehen beim Verbrennungsprozess auch noch andere Schadstoffe, wie z.B. Feinstaub oder Stickoxide. Diese lassen sich zwar durch geeignete Filter verringern, damit einher geht aber ein höherer apparativer Aufwand, welcher wiederum zu höheren Kosten führt. Zusätzlich entsteht auch eine Flächenkonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion für den Frucht- und Pflanzenanbau, da es nur eine beschränkte Flächenverfügbarkeit gibt. Innerhalb Deutschlands ist dies noch kein Problem, könnte aber bei vermehrter Nutzung biogener Brennstoffe zu einem werden. Der Flächenbedarf dieser Technologie steht zudem in Konkurrenz mit anderen Technologien zur Energiegewinnung auf vorhandenen Freiflächen, wie z.B. der Photovoltaik oder Windenergie. Diese können Energie komplett emissionsfrei erzeugen. Ein anderer Grund, warum eine Nutzung biogener Brennstoffe nicht betrachtet wird, ist der benötigte Platz, innerhalb des Gebäudes. Bei biogenen Brennstoffen benötigt man zusätzlich zur Heizung auch noch einen Vorratsbehälter oder Lagerraum für den zu nutzenden Brennstoff. Dieser wird häufig so groß geplant, dass man in ihm einen Jahresvorrat lagern kann, um eventuelle Preisschwankungen ausgleichen zu können. Dieser würde zusätzlichen Raum im Haus einnehmen.

5.2.4 Kraft-Wärme-Kopplung mit biogenen Brennstoffen

Eine bessere Ausnutzung von biogenen Brennstoffen würde die Nutzung einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit sich bringen, da mit ihr eine gleichzeitige Produktion von Wärme und Strom möglich wäre, diese Technologie wird aber wegen der gleichen Ausschlusskriterien, wie in Kapitel 5.2.3 aufgeführt, in dieser Arbeit nicht betrachtet.

6 Maßnahmen zur Optimierung der Speicherung

6.1 Stromspeicherung

Nicht immer, wenn elektrische Energie im Haus benötigt wird, können die PV-Module diesen Bedarf abdecken. Nachts oder bei zu geringem Strahlungsangebot, muss man Strom aus anderen Quellen beziehen. Hinzu kommt auch, dass die PV-Module mehr Energie produzieren, als im Haus genutzt werden kann. Setzt man Akkumulatoren ein, können diese die Energie zwischenspeichern und sie bei Bedarf wieder zur Verfügung stellen.

6.1.1 Akkumulatoren

Die häufigsten Akkumulatoren, die genutzt werden um PV-Strom zwischen zu speichern sind elektrochemische Akkumulatoren. Nachfolgend werden Blei-, Nickel-Metallhydrid-(NiMH)- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren miteinander verglichen. Der Bleiakkumulator hat aufgrund seiner geringen Kosten die größte Verbreitung beim Speichern großer Energiemengen. Die anderen Akkumulatoren besitzen vorteilhafte Eigenschaften, die der Blei-

Akku nicht aufweist. Sie sind aber teurer, weshalb sie sich in der Solarbranche noch nicht durchgesetzt haben. (vgl. Quaschnig 2013, S.219).

Tab.6-1 Kennwerte unterschiedlicher Akkumulatoren (Quelle: Quaschnig 2013, S.219)

Akkumulator	Energiedichte in Wh/kg	Zellspannung In V	Lade-/Entladezyklen	Selbstentladungsrate in %/Monat	Wh-Wirkungsgrad
Blei	25 - 50	2,0	500 - 1500	5 – 15	70 – 85 %
Ni-MH	60 - 120	1,2	ca. 1000	15 - 50	60 – 85 %
Lithium-Ionen	95 - 200	3,6	500 - 10000	<5	70 – 90 %

In allen Bereichen weist der Lithium-Ionen-Akku die besten Eigenschaften auf, siehe Tab.6-1. Er hat die größte Energiedichte und weist die höchste Zellspannung auf. Desweiteren kann er am häufigsten be- und entladen werden. Dies ist eine wichtige Eigenschaft für einen PV-Akkumulator, da viele Lade- und Entladezyklen im Hausbetrieb auftreten. Die Selbstentladung ist kleiner als 5 Prozent pro Monat, bei einem NiMH-Akku beträgt diese ca. ein Prozent pro Tag. Der Wh-Wirkungsgrad gibt das Verhältnis von entnommener zu wieder zugeführter Ladung an, auch hier kann der Lithium-Ionen-Akkumulator den besten Wirkungsgrad aufweisen. Ein Nachteil sind aber geringere Entladeströme und eine vorhandene Brandgefahr bei diesem Akkumulatortypen. Bei sachgemäßem Betrieb wird dies aber durch elektronische Zellabsicherungen weitestgehend verhindert (vgl. Quaschnig 2013, S.224). Abschließend betrachtet, überwiegen die positiven Eigenschaften des Lithium-Ionen-Akkumulator, weshalb dieser trotz höherer Kosten im neuen Energiekonzept des Effizienzhauses wieder zum Einsatz kommt.

6.1.2 Zusätzliche Nutzung von Elektrofahrzeugen

Man kann in Akkumulatoren von Elektrofahrzeugen, den am Haus erzeugten Strom zwischenspeichern, dabei treten jedoch Probleme auf. Mit jedem Gebrauch (Zyklus) wird die Kapazität des Akkus geringer. Durch die Doppelnutzung, als Zwischenspeicher für das Haus und als Energiequelle fürs Fahrzeug, treten viele Lade- und Entladezyklen auf. Diese verringern schnell die Lebensdauer des Akkus. Außerdem steht diese Möglichkeit der Speicherung und Entnahme nur zur Verfügung, wenn die Elektrofahrzeuge mit dem Haus verbunden sind. Dies schränkt die Möglichkeiten stark ein, da die Priorität der Elektrofahrzeuge eine flexible Nutzung ist und die Speicherung der Energie nur nachrangig zu bewerten ist. Um eine bidirektionale Nutzung von Elektrofahrzeugen zur Energiespeicherung zu nutzen, auch zu einer eventuellen Stabilisierung des deutschen Stromnetzes, bedarf es auf diesem Gebiet noch an Forschungsarbeit (vgl. Eltrop et al. 2014).

6.2 Wärmespeicherung

Bei der Nutzung von Erneuerbaren Energien kommt es zu einer zeitlichen Abweichung zwischen Bedarf und Produktion, vgl. Kapitel 6.1.1. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, auch Wärmeenergie zwischen zu speichern und sie zur Verfügung zu stellen, wenn sie

benötigt wird. Thermische Speicher lassen sich in verschiedene Technologien unterscheiden. Nachfolgend werden sensible Wasserspeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher vorgestellt, verglichen und abschließend bewertet.

Sensible Speicher, bezeichnen Speicher mit einer fühlbaren Änderung der Temperatur. Sie nutzen meistens Wasser als Wärmedium, da es eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt und es ungiftig sowie kostengünstig ist. Diese Art von Speicher wird am häufigsten als Pufferspeicher für Heizung und/oder zur Warmwasserbereitung eingesetzt. Eine weitere Speichermöglichkeit sind Latentwärmespeicher. Sie nutzen neben der Temperaturerhöhung einen Phasenwechsel des Speichermediums, mit ihnen lässt sich bei gleichen Temperaturunterschieden mehr thermische Energie speichern, als es sensible Speicher können. Der Phasenwechsel findet meistens zwischen fest und flüssig statt, da dieser eine ausreichend große Übergangsenthalpie hat und eine geringe Volumenänderung aufweist (vgl. Hauer et al. 2013, S.22). Hinzu kommen noch thermochemische Speicherprozesse, welche durch reversible chemische Reaktionen, thermische Energie zwischenspeichern können. Sie haben den Vorteil, dass sie je nach Zusammensetzung, die Temperaturniveaus beim Laden und Entladen den gegenwärtigen Bedürfnissen anpassen können (vgl. Hauer et al. 2013, S.23).

Tab.6-2 Eigenschaften verschiedener Wärmespeichertechnologien (Quelle: Hauer et al. 2013, S.17)

Eigenschaften	Sensible Speicher	Latentwärmespeicher	Thermochemische Speicher
Leistung in MW	<10	<10	<1
Kapazität in MWh	<100	<10	<10
Speicherdauer	Stunden - Jahr	Stunden - Woche	Stunden - Woche
Energiedichte in kWh/t	10 – 50	50 – 150	120 – 250
Effizienz in %	50 – 90	75 – 90	80 – 100
Lebensdauer/ Zyklenzahl	≈5000	≈5000	≈3500

Für die Warmwasserbereitstellung benötigt man hohe thermische Leistungen, diese besitzen nur sensible und Latentwärmespeicher, siehe Tab.6-2. Im Zusammenwirken mit den Solarthermie-Kollektoren und der Sole/Wasser-Wärmepumpe, eignet sich ein sensibler Speicher am besten. Er hat zwar eine geringere Energiedichte als ein Latentwärmespeicher, dieser Nachteil ist aber zu vernachlässigen, da im Haus genügend Platz für einen sensiblen Speicher vorhanden ist. Der entscheidende Vorteil ist, dass man mit ihm Wärme auf einem hohen Temperaturniveau speichern und wieder zur Verfügung stellen kann. Dies ist mit einem Latentwärmespeicher schlechter zu erreichen, da hohe thermische Leistungen nur mit aufwendigen Einbauten zur Wärmeübertragung zu erreichen sind (vgl. Hauer et al. 2013, S.35).

7 Neues Energiekonzept des Effizienzhaus Plus

Aus den Erkenntnissen der Maßnahmen zur Optimierung von Produktion und Speicherung wird ein neues Energiekonzept für das Effizienzhaus Plus entwickelt. Bei den nachfolgenden Berechnungen werden teilweise idealisierte Annahmen getroffen. Um genauere Verluste durch z.B. Verschattung der PV-Module oder den veränderten Energieverbrauch der Hilfs- und Anlagentechnik sowie Leitungs- und Speicherverluste, etc. zu betrachten, müssten die komplexen Vorgänge im und am Haus mit einem dafür geeigneten Programm simuliert werden.

7.1 Berechnungen

Zusammenfassend werden vor den Berechnungen noch einmal die in Kapitel 5 ausgewählten Technologien aufgezählt, welche im neuen Energiekonzept zum Einsatz kommen:

Stromproduktion

- ❖ Photovoltaik-Dach: HIT-Module
- ❖ Photovoltaik-Fassade: CIS-Module

Wärmeproduktion

- ❖ Wärmepumpe: Erdwärmesonden
- ❖ Solarthermie: Vakuumröhrenkollektoren

Speicherung

- ❖ Strom: Lithium-Ionen Akkumulator
- ❖ Wärme: Sensibler Speicher

Um die Energiebilanz des neuen Konzeptes aufstellen zu können, wird zuerst der Bedarf aller nicht veränderbaren Größen aufgeführt (vgl. Kapitel 4.3.2 und 4.4.1):

❖ Thermischer Energiebedarf:	9372 kWh
❖ Elektrischer Energiebedarf:	6535 kWh
➤ Hilfsenergie:	3099 kWh
➤ Beleuchtung:	526 kWh
➤ Haushalt:	2910 kWh

Der Heizwärmebedarf des Hauses wird über eine Solarthermieanlage oder über die Wärmepumpe gedeckt. Das EEWärmeG schreibt vor, dass mindestens 15 Prozent des Wärme- und Kälteenergiebedarfs durch die Solarthermie zu decken ist und mindestens 50 Prozent durch die Wärmepumpe. Der Vorteil der Wärmepumpe ist, dass sie das ganze Jahr über Wärme zur Verfügung stellen kann, dafür aber zusätzlich Strom benötigt. Ein weiterer Nachteil ist, je höher der Temperaturunterschied zwischen zugeführter und abgegebener Wärme ist, desto ineffizienter arbeitet die Wärmepumpe. Die Solarthermie hingegen kann durch die eingestrahelte Sonnenenergie Wärme produzieren, dadurch ist sie

aber im Winter nur eingeschränkt nutzbar. Da für die Warmwasserbereitung höhere Temperaturen benötigt werden, als für die Heizung, wird nachfolgend berechnet wie viel Energie die solarthermische Anlage zur Warmwasserbereitung beitragen kann, den Rest deckt die Wärmepumpe ab.

Solarthermie

In Deutschland legt man solarthermische Anlagen aufgrund der klimatischen Bedingungen so aus, dass eine im Jahresmittel ca. sechzig prozentige Deckung des Warmwasserbedarf realisiert werden kann (vgl. Quaschnig 2013, S.133), dies wird auch hier angewendet. Zuerst lässt sich die benötigte Speichergroße V_{Sp} berechnen, für die vierköpfige Familie ($n= 4$) mit einem spezifischen Warmwasserbedarf von $V_P= 30$ Litern pro Tag und Person (vgl. Quaschnig 2013, S.130):

$$V_{Sp} = 2 \cdot n \cdot V_P \quad (7.1)$$

Demnach muss der Speicher ein Volumen von 240 Litern aufweisen. Anschließend kann man mit einem durchschnittlichen spezifischen Warmwasserbedarf von $Q_n= 1,2$ kWh pro Tag und Person (vgl. Quaschnig 2013, S.130) den jährlichen Warmwasserbedarf Q_N der Familie berechnen:

$$Q_N = 365 \cdot n \cdot Q_n \quad (7.2)$$

Daraus ergibt sich ein Jahreswärmebedarf von $Q_N= 1752$ kWh für die Warmwasserbereitung. Vernachlässigt man die Speicherverluste, ergibt sich mit einer solaren Bestrahlung im Messzeitraum von $H= 1077\pm 2$ kWh/(m²a)¹⁰, einem jährlichen solaren Deckungsgrad von $SD= 60$ % sowie einem durchschnittlichen Kollektorkreiswirkungsgrad von $\eta_{KN}= 30$ % (vgl. Quaschnig 2013, S.134) eine Flachkollektorfläche A_{FK} von:

$$A_{FK} \approx \frac{SD}{\eta_{KN}} \cdot \frac{Q_N}{H} \quad (7.3)$$

Die Fläche für einen solarthermischen Flachkollektor müsste 3,25 m² betragen. Bei Vakuumröhrenkollektor sind die Wärmeverluste geringer, weshalb man mit ihnen ca. 30 % weniger Kollektorfläche benötigt (vgl. Quaschnig 2013, S.133). Daraus ergibt sich eine Vakuumröhrenkollektorfläche von 2,3 m² um 1752 kWh Nutzwärme zur Warmwasserversorgung zur Verfügung zu stellen.

Wärmepumpe

Die restliche Wärmeenergie zur Deckung der Heiz- und verbleibenden Warmwasserversorgung von $Q_H= 7620$ kWh muss die Wärmepumpe produzieren. Um den Energieüberschuss der Schlussbilanz feststellen zu können, muss noch der Strombedarf der Wärme-

¹⁰ Wetterdaten im elektronischen Anhang. Die Ungenauigkeit von ± 2 kWh/(m²a) kommt von der Auflösung der Globalstrahlungskarten des DWD für Januar und Februar 2013.

pumpe ermittelt werden. Von einer Jahresarbeitszahl von $\beta = 3,6$ ausgehend (vgl. Kapitel 5.2.1) berechnet sich die benötigte elektrische Energie:

$$W_{\text{el}} = \frac{Q_{\text{H}}}{\beta} \quad (7.4)$$

Daraus ergibt sich ein elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpe von 2117 kWh. Dieser Betrag muss zusätzlich zum Energiebedarf für Hilfsenergie, Beleuchtung und Haushalt von 6535 kWh hinzuaddiert werden, daraus ergibt sich ein Gesamtenergiebedarf von 8652 kWh.

Photovoltaik-Dach

Zur Berechnung der PV-Erträge wird zuerst die Lage des Hauses bestimmt. Breiten- und Längengrad betragen $52,51^\circ$ Nord und $13,33^\circ$ Ost, das Dach neigt sich 3° nach Westen und 2° nach Osten. Bei dieser geringen Neigung wird die Fläche als horizontal angenommen. Die Fassade hat einen Winkel von 90° zur Horizontalen.

Es werden verschiedene Ausrichtungen und Neigungswinkel betrachtet und die Höhe der jeweiligen solaren Erträge wird berechnet. Optimal sind PV-Module nach Süden mit einem Neigungswinkel von ca. 30° ausgerichtet, vgl. Abb.7-1. Bei diesem Winkel tritt auch eine ausreichende Selbstreinigung der Module auf, wobei Regenwasser Verschmutzung wie Staub, Vogelkot oder ähnliches von den Modulen spült. Für die Berechnung werden die in Kapitel 5.1.1 ausgewählten HIT-Module genutzt¹¹.

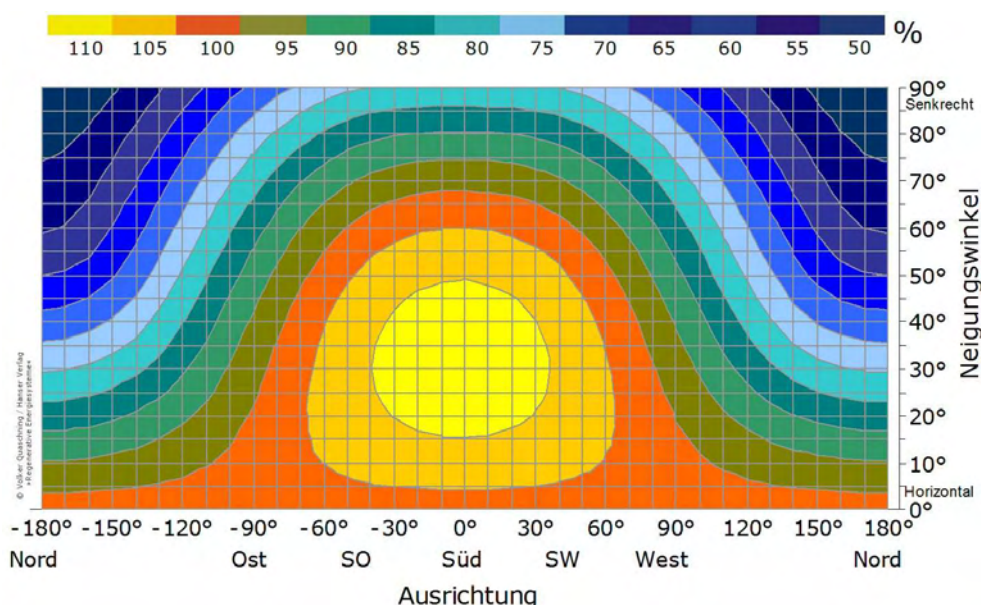


Abb.7-1 Änderung der jährlichen solaren Bestrahlung in Berlin in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung im Vergleich zur Horizontalen (Quelle: Quaschnig 2009, S. 71)

Es werden zwei Aufstellungsvarianten betrachtet. Bei der ersten Variante wird vorrangig eine optimale Ausrichtung gewählt (Azimutwinkel= 25°), und nachrangig versucht die

¹¹ Sanyo: VBHN 240 SE 01, Datenblatt im Anhang

Dachfläche optimal auszunutzen. Anschließend wird vorrangig die maximale Dachfläche ausgenutzt und nur nachrangig die Ausrichtung beachtet. Um eine Eigenverschattung durch die davor stehende Modulreihe zu verhindern, werden die Module so aufgestellt, dass am 21. Dezember zur Mittagszeit gerade keine Verschattung auftritt, siehe Abb.7-2.

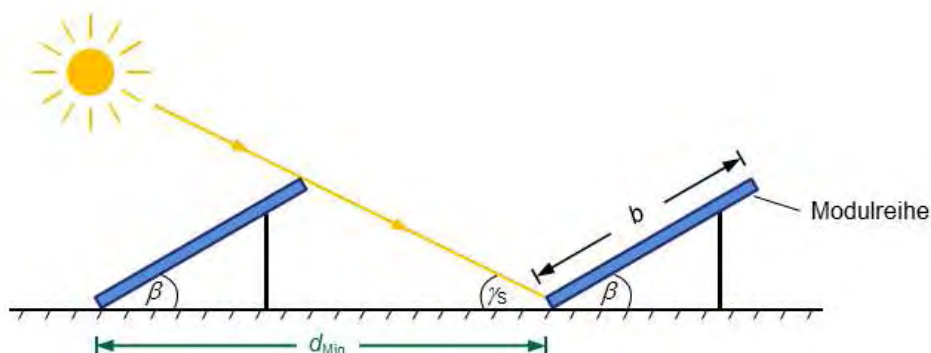


Abb.7-2 Vermeidung von Eigenverschattung durch andere PV-Module (Quelle: Mertens 2013, S.239)

Die Sonnenhöhe wird zu diesem Zeitpunkt mit einem Winkel $\gamma_S = 15^\circ$ angenommen (vgl. Mertens 2013, S.239). Um möglichst viele PV-Module auf das Dach stellen zu können, werden unterschiedliche Neigungswinkel von $\beta = 10$ bis 30° untersucht. Der Modulabstand lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$d_{\text{Min}} = b \cdot \frac{\sin(\gamma_S + \beta)}{\sin \gamma_S} \quad (7.5)$$

Unter Berücksichtigung der Eigenverschattung, des Solarthermiekollektors¹² und der zur Verfügung stehenden Dachfläche kommt man auf eine maximale Anzahl von¹³:

- ❖ 10° Neigung = 62 Module
- ❖ 20° Neigung = 41 Module
- ❖ 30° Neigung = 34 Module

Die Stelle, an welcher der Solarthermiekollektor aufgestellt ist, kann man stellvertretend in Abb.7-3 sehen. Bei der Südausrichtung muss aber nur mit ein Modul weniger gerechnet werden. Der Ertrag $E_{\text{elektrisch}}$ berechnet sich dann nach folgender Formel:

$$E_{\text{elektrisch}} = \frac{H \cdot f_{\text{Neigung}} \cdot P_{\text{MPP}} \cdot PR}{1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} \quad (7.6)$$

Die jährliche Globalstrahlung im Messzeitraum beträgt $H = 1077 \pm 2 \text{ kWh / (m}^2\text{a)}$. Hinzu kommen Verluste aufgrund der Ausrichtung und Neigung, welche aus Abb.7-1 entnommen werden, sie ergeben den Verlustfaktor f_{Neigung} . Die Nennleistung P_{MPP} der PV-Module berechnet sich aus der Anzahl der Module, multipliziert mit der Nennleistung ei-

¹² Paradigma: AQUA PLASMA 19/34, Datenblatt in Anhang

¹³ Nebenrechnung im elektronischen Anhang

nes Moduls. Um die Verluste der gesamten Anlage für z.B. Leitungs-, Wechselrichter- und Wärmeverlusten, Verschmutzungen sowie Verschattungen zu beachten, wird eine Performance Ratio PR gebildet (vgl. Quaschnig 2010, S.122). Für die Module mit 10° Neigung wird eine PR von 0,8 angenommen, da diese eine schlechtere Selbstreinigung und Hinterlüftung aufweisen, für die anderen beiden Neigungen wird eine PR von 0,85 gewählt. Tab.7-1 zeigt die Ergebnisse der Ertragsberechnung.

Tab.7-1 Ertrag der Dach-Module mit unterschiedlichen Neigungswinkeln

Azimut	Neigung	Installierte Nennleistung	Fläche PV-Module	Ertrag
25°	10°	15,12 kW	78,12 m ²	13462 kWh
25°	20°	10,08 kW	51,66 m ²	9909 kWh
25°	30°	8,4 kW	42,84 m ²	8217 kWh

Die andere Variante, ist die auch real zum Einsatz gekommene, hier wird die Dachfläche maximal ausgenutzt, bei noch akzeptablen Verlusten aufgrund von Neigung und Ausrichtung. Eine Ost/West-Aufstellung mit einem Azimutwinkel von -65° bzw. 115° und einem Neigungswinkel von 10° wird analysiert. Zum Rand und nach jeder Ost/West ausgerichteten Modulreihe wird wie beim realen Haus, ein Wartungsgang mit einer Breite von 0,25 m angenommen (vgl. Abb.3-7). Bei dieser Variante könnte man maximal 84 Module auf dem Dach aufstellen. Durch den Solarthermiekollektor reduziert sich die Anzahl auf 82 Module, siehe Abb.7-3. Den Gesamtertrag dieser Ausrichtung, zeigt Tab.7-2¹⁴.

Tab.7-2 Ertrag der flächenoptimierten Dach-Module

Azimut	Neigung	Installierte Nennleistung	Fläche PV-Module	Ertrag
-65°	10°	9,84 kW	51,66 m ²	8478 kWh
115°	10°	9,84 kW	51,66 m ²	8054 kWh
		19,68 kW	103,32 m²	16532 kWh

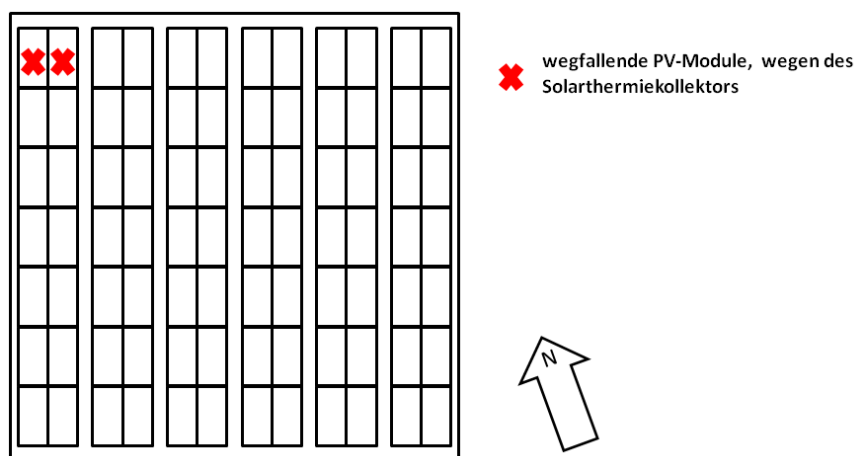


Abb.7-3 PV-Module in Ost/West-Ausrichtung unter Berücksichtigung des Solarthermiekollektors

¹⁴ Nebenrechnung im elektronischen Anhang

Photovoltaik-Fassade

Die an der Fassade angebrachten PV-Module¹⁵ werden in einem Azimutwinkel von 25° und einem Neigungswinkel von 90° betrachtet. Die Erträge werden nach demselben Verfahren ermittelt, wie bei den Solarmodulen auf dem Dach. Aufgrund der nicht so guten Hinterlüftung und der Verschattung aufgrund der Statue vor der Südfassade, beträgt die PR nur 0,7. Die PV-Module haben die gleichen Außenmaße, wie die zuvor verwendeten Module. Daraus ergibt sich für die 100 PV-Module ein Gesamtertrag von insgesamt 5579 kWh, siehe auch Tab.7-3.

Tab.7-3 Ertrag der Fassadenmodule

Azimut	Neigung	Installierte Nennleistung	Fläche PV-Module	Ertrag
25°	90°	9,25 kW	72,0 m ²	5579 kWh

Akkumulator

Ein Einfamilienhäusern kann mit einem intelligenten Energiemanagementsystem, in Verbindung eines Akkumulators, den Anteil des im Haus genutzten PV-Stroms von ca. 15 bis 20 Prozent auf über 60 Prozent erhöhen (vgl. Fisch et al. 2012, S.158). Dies bestätigen die real am Haus gemessenen Daten. In dem Messzeitraum betrug die Eigenstromnutzung 49,3 %. Um genauer analysieren zu können, wie viel Energie in dem Lithium-Ionen Akkumulator zwischengespeichert werden kann, benötigt man aufwendige Simulationsprogramme. Diese können mit verschiedenen Lastszenarien, wie z.B. Werktage, Wochenenden oder Urlaube, unter Einbeziehung historischer Wetterdaten über ein ganzes Jahr simulieren. Damit lässt sich feststellen, wie groß ein Akkumulator zu dimensionieren ist, um einen bestimmten Anteil des produzierten Stroms selber im Haus nutzen zu können.

Wärmespeicher

Bei den Berechnungen zur Solarthermie hat sich ergeben, dass ein 240 l Warmwasserspeichers zur Zwischenspeicherung benötigt wird. Aus diesem Grund wird der schon im Haus vorhandene 300 l Speicher verwendet. Die Bereitschaftsverluste des Speichers betragen 2,2 kWh pro Tag, aufsummiert auf ein Jahr ergibt dies einen Verlust von 803 kWh. Diese Wärmeenergie muss die Wärmepumpe noch zusätzlich abdecken, wodurch sie einen um 223 kWh höheren Stromverbrauch hat. Er beträgt jetzt 2340 kWh.

7.2 Vergleich altes und neues Energiekonzept und Diskussion der Ergebnisse

Das neue Energiekonzept würde im Zeitraum März 2012 bis Februar 2013 vierzehnmal mehr Energie erwirtschaften, als das real zum Einsatz gekommene, siehe Tab.7-4. Es fällt dabei auf, dass die PV-Module insgesamt 8805 kWh mehr Strom produzieren und gleichzeitig der Bedarf der Wärmepumpe um 3748 kWh gesunken ist. Zusammenfassend be-

¹⁵ First Solar: FS-392, Datenblatt siehe Anhang

trägt der Gesamtenergieüberschuss des neuen Konzepts 13236 kWh, womit er um 12330 kWh über dem Überschuss des alten Konzepts liegt.

Tab.7-4 Gegenüberstellung des alten und neuen Energiekonzepts

	Altes Energiekonzept	Neues Energiekonzept
PV-Module	+13.306 kWh	+22.111 kWh
Wärmepumpe	-5.865 kWh	-2.340 kWh
Hilfsenergie	-3.099 kWh	-3.099 kWh
Beleuchtung	-526 kWh	-526 kWh
Haushalt	-2.910 kWh	-2.910 kWh
Summe	+906 kWh	+13.236 kWh

Es ist deutlich zu erkennen, dass das neue Energiekonzept einen weit größeren Energieüberschuss als das alte Konzept erwirtschaftet. Der Grund hierfür ist der Einsatz anderer Technologien, z.B. lassen sich durch die Nutzung von Solarthermie sechzig Prozent des Warmwasserbedarf bzw. neunzehn Prozent des gesamten Wärmebedarfs abdecken, ohne den Einsatz von elektrischer Energie. Der dafür benötigte Platz nimmt nur einen geringen Teil der Dachfläche ein, sodass nur zwei PV-Module, gegenüber der maximalen Auslegung, nicht auf dem Dach montiert werden könnten.

Der Vorteil einer Wärmepumpe mit Erdwärmesonden ist, dass sie das ganze Jahr über eine konstante Wärmeleistung aus dem Boden entziehen kann. Sie weist dadurch eine bessere Effizienz auf, als einer Wärmepumpe welche Umgebungsluft als Wärmequelle nutzt, vgl. Kapitel 5.2.1.

Neben den technischen Verbesserungen muss auch berücksichtigt werden, dass seit dem Bau des EHP's 2011 effizientere Technologien zur Verfügung stehen. Desweiteren wurden reale Erträge und Verbräuche, mit theoretischen Werten verglichen. Die realen Verluste können aber nur über Verlustfaktoren berücksichtigt werden. Diese werden aus Erfahrungen im Betrieb verschiedener Anlagen ermittelt und geben daher nur bedingt die realen Verluste innerhalb des Hauses wieder. Selbst mit aufwendigen Simulationsprogrammen lässt sich heutzutage das reale Nutzerverhalten sowie andere Einflussfaktoren wie z.B. das Wetter nur begrenzt abbilden. Dies zeigt auch der große Unterschied zwischen den vorherberechneten und den realen Daten des Berliner Effizienzhauses.

8 Schlussbetrachtung und Ausblick

Abschließend kann festgestellt werden, die Maßnahmen zur Optimierung der Produktion haben zu einem deutlichen Energieüberschuss geführt. Das Optimieren des Akkumulators zeigt sich als deutlich schwieriger, da für eine genaue Betrachtung die komplexen Zusammenhänge zwischen Produktion der PV-Module und dem Verbrauch im Haus zeitlich sehr genau aufgelöst benötigt werden. Aus den realen Messdaten und der Fachliteratur geht aber hervor, dass bis zu fünfzig oder sechzig Prozent der produzierten Energie im Haus genutzt werden können. Dadurch wird der Eigenanteil des produzierten Stroms höher und das Versorgungsnetz weniger belastet.

Eine der wichtigsten Frage ist, welche Ziele man mit seinem Energiekonzept erreichen will? Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten der Auslegung, z.B. kann man seinen Fokus auf möglichst geringe finanzielle Investitionen oder einen maximalen Ertrag legen. In dieser Arbeit wurde versucht, den technisch größtmöglichen Energieüberschuss zu erwirtschaften, ohne Berücksichtigung der damit zusammenhängenden Kosten. Dadurch soll das Potential des Berliner Hauses aufgezeigt werden, den Anteil der erneuerbaren Energien am deutschen Strommix zu vergrößern. Interessant wäre auch zu betrachten, wie man mit geringem finanziellen Einsatz einen möglichst großen Energieüberschuss erwirtschaften kann.

Wie groß der Anteil an Effizienzhäusern Plus am deutschen Gebäudesektor überhaupt werden kann, wird sich erst in Zukunft zeigen. Nicht jeder Standort eignet sich um ein Effizienzhaus Plus zu bauen (vgl. Anforderungen Kapitel 2.2). Der Standort darf z.B. nicht zu stark verschattet werden oder es kann andere negative Umwelteinflüsse bzw. gesetzliche Vorgaben geben, die das Erreichen der Effizienzhaus Plus Vorgaben verhindern. Ob diese Gebäude einen signifikanten Anteil zur Deckung des deutschen Endenergiebedarf beitragen können, bleibt abzuwarten.

Dies wirft eine weitere Fragestellung auf. Was passiert, wenn nach sorgfältiger Planung neben einem Effizienzhaus Plus ein anderes Gebäude errichtet wird, welches das Haus bzw. das Grundstück verschatten oder anders nachteilig beeinträchtigt? Folgen diesbezüglich noch gesetzliche Regelungen oder muss dies beim Bau mit einkalkuliert werden? Durch diese Planungsunsicherheit könnte man interessierte Bauherren eines Effizienzhauses Plus verschrecken.

Die Optimierung des Eigenbedarfes könnte in zukünftigen Arbeiten genauer analysiert werden oder auch der Zusammenschluss von mehreren Effizienz Plus Häusern zu einem virtuellen Kraftwerk bzw. Energiespeicher. Hierfür müsste aber die Gebäudetechnik vom Energieversorger ferngesteuert werden, was Probleme mit der Sicherheit der Daten mit sich brächte. Weiterhin fehlt eine Vergütung für diese Leistungen in Deutschland bislang.

Abbildungsverzeichnis

Abb.2-1 Entwicklung des energiesparenden Bauens in Deutschland (Quelle: Erhorn, geändert durch Verfasser).....	4
Abb.3-1 Lageplan-Maßstab 1:1000 (Quelle: BMVBS 2012, S.7)	8
Abb.3-2 Effizienzhaus Plus (Quelle: Koslik 2014).....	10
Abb.3-3 Grundriss EG (Quelle: IBP 2013, S.5).....	10
Abb.3-4 Grundriss OG (Quelle: IBP 2013, S.5)	10
Abb.3-5 Aufbau gedämmte opake Außenwand (Quelle: BMVBS 2012, S.17)	11
Abb.3-6 Haustechnikkonzept (Quelle: IBP 2013, S.7)	12
Abb.3-7 Blick auf das Dach von Nord-Ost (Quelle: ENBAUSA 2014)	13
Abb.3-8 Blick auf die Südfassade (Quelle: Manu 2014).....	14
Abb.3-9 Gehäuse des Akkumulators, Links: elektronische Bauteile mit Lade- u. Wechselrichter, Rechts: Akkumulator-zellenblock (Quelle: BBR 2012).....	14
Abb.4-1 Energiebilanz des Effizienzhaus Plus (nach Hegger et al. 2013, S.91)	17
Abb.4-2 Messkonfiguration Elektroversorgung (nach IBP 2013, S.10)	18
Abb.4-3 Messkonfiguration Wärmeversorgung (nach IBP 2013, S.11)	19
Abb.4-4 Vorberechnete und gemessene Strahlungsintensitäten und Stromerträge der PV-Anlage.....	20
Abb.4-5 monatlicher Endenergieverbrauch (Quelle: IBP 2013, S.8)	22
Abb.4-6 Kumulierter gebäudebezogener Energieverbrauch (rot) und Energieertrag der PV-Module (blau) im Messzeitraum (Quelle: IBP 2013, S.16, ergänzt durch Verfasser).....	23
Abb.4-7 Bilanz der PV-Anlage (Quelle: BMVBS 2014, ergänzt durch Verfasser).....	23
Abb.4-8 Gemessene und vorherberechnete Außenlufttemperatur im Messzeitraum 03.2012 - 02.2013 (Quelle: IBP 2013, S.12, ergänzt durch Verfasser)	25
Abb.5-1 Theoretischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Bandabstandes (Quelle: Konrad Mertens, S.106)	27
Abb.5-2 Prinzip der Kompressionswärmepumpe (Quelle: Quaschnig 2009, S.320)	32
Abb.5-3 Kollektorstufenwirkungsgrade η_k über der Temperaturdifferenz $\vartheta_k - \vartheta_U$ für verschiedene Kollektortypen bei einer Bestrahlungsstärke von 800 W/m ² (Quelle: Quaschnig 2013, S.116, ergänzt durch Autor)	36
Abb.7-1 Änderung der jährlichen solaren Bestrahlung in Berlin in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung im Vergleich zur Horizontalen (Quelle: Quaschnig 2009, S. 71)	42
Abb.7-2 Vermeidung von Eigenverschattung durch andere PV-Module (Quelle: Mertens 2013, S.239)	43
Abb.7-3 PV-Module in Ost/West-Ausrichtung unter Berücksichtigung des Solarthermiekollektors.....	44

Tabellenverzeichnis

Tab.2-1 Energiepolitische Ziele der Bundesregierung (Quelle: BMWi/BMU 2010, S.5).....	3
Tab.2-2 KfW-Programme und deren prozentualer Unterschied gegenüber der Mindestanforderungen nach EnEV (nach Hegger et al. 2013, S.84).....	6
Tab.2-3 Unterschiede der Randbedingungen - EnEV / PHPP (Quelle: Hegger et al. 2013, S.86)	7
Tab.3-1 Bauliche Angaben und Gebäudekennwerte (Quellen: BMVBS 2012, S.7, BMVBS B 2013, S.2, vgl. Sobek 2011).....	9
Tab.3-2 Technische Daten PV-Module (Quelle: BMVBS 2012, S.9)	12
Tab.4-1 Vergleich zwischen vorherberechneter und tatsächlich gemessener elektrischer Energie (Quelle: IBP 2013, S.15-17 ergänzt durch Autor)	20
Tab.4-2 Sonnenscheindauer in Berlin: Tegel und Tempelhof (Quelle: DWD).....	21
Tab.4-3 Endenergieverbrauch 03.2012 bis 02.2013 (Quelle: IBP 2013, S.16 ergänzt durch Autor)	21
Tab.4-4 Vergleich thermische zu elektrischer Arbeit der Wärmepumpe im Messzeitraum (aus Monitoring-Daten im elektronischen Anhang)	24
Tab.5-1 Gegenüberstellung verschiedener Photovoltaik-Zelltypen (Quelle: Quaschnig 2013, S.170-255 / Kaltschmitt 2013, S.353-450)	28
Tab.5-2 Gegenüberstellung von Wärmepumpen mit verschiedenen Wärmequellen (vgl. Quaschnig 2013, S.339-343 / Kaltschmitt 2013, S.621-691)	34
Tab.5-3 Typische Kollektorkennwerte (nach Kaltschmitt 2013, S.201).....	35
Tab.6-1 Kennwerte unterschiedlicher Akkumulatoren (Quelle: Quaschnig 2013, S.219)....	38
Tab.6-2 Eigenschaften verschiedener Wärmespeichertechnologien (Quelle: Hauer et al. 2013, S.17)	39
Tab.7-1 Ertrag der Dach-Module mit unterschiedlichen Neigungswinkeln.....	44
Tab.7-2 Ertrag der flächenoptimierten Dach-Module.....	44
Tab.7-3 Ertrag der Fassadenmodule	45
Tab.7-4 Gegenüberstellung des alten und neuen Energiekonzepts.....	46

Abkürzungsverzeichnis

Akku	Akkumulator
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
CdTe	Cadmium-Tellurid
CIS	Kupfer-Indium-Selenid bzw. Kupfer-Indium-Sulfid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmeengesetz
EHP	Effizienzhaus Plus
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
HIT-Zelle	Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer-Zelle
IBP	Fraunhofer Institut für Bauphysik
JAZ	Jahresarbeitszahl
KWEA	Kleinwindenergieanlage
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NN	Normal-Null
OPEC	Organisation erdölexportierender Länder
PHPP	Passivhaus-Projektierungs-Paket
PV	Photovoltaik
Si	Siliziumzellen
WärmeSchutzV	Wärmeschutzverordnung

Nomenklatur

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
β	Arbeitszahl	-
ε	Leistungszahl	-
η	Wirkungsgrad	%
η_{KN}	Kollektorkreiswirkungsgrad	%
ϑ_{K}	Kollektortemperatur	°C
ϑ_{U}	Umgebungstemperatur	°C
A	Fläche	m ²
A_{FK}	Flachkollektorfläche	m ²
A_{N}	Energiebezugsfläche	m ²
b	Breite Kollektor	m
d_{Min}	Mindestmodulabstand	m
f_{Neigung}	Verlustfaktor Neigung	-
F_{S}	Verschattungsfaktor	-
H	Globalstrahlung	W/m ²
H'_{T}	Transmissionswärmeverluste	W/(m ² a)
P_{h}	Heizleistungsbedarf	W
P_{el}	elektrische Leistung	W
P_{MPP}	Nennleistung	W
Q_{e}	spez. Endenergiebedarf	kWh/(m ² a)
\dot{Q}_{H}	thermische Leistung	W
Q_{H}	Jahresheizwärmebedarf	kWh
Q_{n}	spez. Warmwasserbedarf pro Person und Tag	kWh
Q_{N}	Warmwasserbedarf	kWh
Q_{P}	spez. Primärenergiebedarf	kWh/(m ² a)
SD	Solarer Deckungsgrad	%
V_{e}	beheiztes Volumen	m ³
V_{P}	Warmwasserbedarf	l
V_{Sp}	Speichervolumen	l
W_{el}	elektrische Arbeit	kWh
γ_{S}	Winkel Sonnenhöhe	°

Literaturverzeichnis

BBR 2014a

Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung: *Wärmeschutzverordnung*, URL: http://www.bbsrenergieeinsparung.de/nn_1024924/EnEVPortal/DE/Archiv/WaermeschutzV/wschr__node.html?__nnn=true - Abgerufen am 06.03.2014

BBR 2014b

Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung: *Energieeinsparverordnung*, URL: http://www.bbsr-energieeinsparung.de/cln_032/nn_1025190/EnEVPortal/DE/Archiv/EnEV/enev__node.html?__nnn=true - Abgerufen am 06.03.2014

BBR 2014c

Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung: *Novellierungsverfahren des Energieeinsparrechts 2013*, URL: http://www.bbsrenergieeinsparung.de/cln_032/nn_1024218/EnEVPortal/DE/EnEV/EnEV2012/2012__node.html?__nnn=true - Abgerufen am 06.03.2014

Berlin 2012

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin: *Erdwärmenutzung in Berlin*, Berlin, URL: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/wasser/wasserrecht/pdf/leitfaden-erdwaerme.pdf> - Abgerufen am 06.03.2014

Berlin 2014

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin: *Geothermisches Potential*, Berlin, URL: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i218.htm> - Abgerufen am 06.03.2014

Berlin 2014a

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin: *Winddaten: Berlin-Tempelhof, Messzeitraum: 1975 - 1990, Höhe: 10 m*, URL: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d403_02.htm - Abgerufen am 06.03.2014

BMVBS 2011

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): *Wege zum Effizienzhaus Plus*, Berlin

BMVBS 2012

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): *Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität – Technische Informationen und Details*, Berlin

BMVBS 2014a

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Netzwerk- Effizienzhaus Plus*, URL: http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Modellvorhaben/Netzwerk/effizienzhaus-plus-neubauten_node.html - Abgerufen am 06.03.2014

BMVBS 2014b

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Steckbrief – Effizienzhaus Plus*, URL: <http://www.bmvi.de/cae/servlet/contentblob/86332/publicationFile/55885/berlin-anhang.pdf> - Abgerufen am 06.03.2014

BMVBS 2014c

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Messdaten zum Effizienzhaus Plus*, URL: http://www.bmvi.de/DE/EffizienzhausPlus/Monitoring/node.html?gtp=79028_liste%253D4 - Abgerufen am 06.03.2014

BMVI 2014

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Wohnhäuser mit Plus-Energie Niveau – Definition und Berechnungsmethode* URL: http://www.bmvi.de//SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/Bauen/anlage-1-definition_und_berechnungsgrundlage.pdf?__blob=publicationFile - Abgerufen am: 06.03.2014

BMW/BMU 2010

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*,

EEWärmeG 2009

Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)

Eltrop et al. 2014

Eltrop, Ludger/ Kruck, Christoph/ Hartmann, Niklas/ Barth, Rüdiger/ Apfelbeck, Jürgen: *Speicherkraftwerke und Elektroautos*, URL: <http://www.uni-stuttgart.de/hkom/publikationen/themenheft/06/Speicherkraftwerke.pdf> – Abgerufen am 06.03.2014

ENBAUSA 2014

Energetisch Bauen und Sanieren: *Beim Effizienzhaus Plus gibt es neue Fragen*, URL: <http://www.enbausa.de/solar-geothermie/aktuelles/artikel/beim-effizienzhaus-plus-berlin-gibt-es-neue-fragen-3426.html> – Abgerufen am 06.03.2014

EnEV 2009

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)

Erdmann/Zweifel 2008

Erdmann, Georg/ Zweifel, Peter: *Energieökonomik: Theorie und Anwendung*, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-71698-3

Erhorn

Erhorn, Hans: *Vortrag Das BMVBS Netzwerk Effizienzhaus Plus*, URL: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/EHP/veranstaltung_01_download_03.pdf?__blob=publicationFile – Abgerufen am 06.03.2014

Fisch et al. 2012

Fisch, Norbert/ Wilken, Thomas/ Stähr, Christina: *Energie Plus – Gebäude und Quartiere als erneuerbare Energiequellen*, Leonberg, ISBN: 978-3-0003-9167-5

IBP 2013

Fraunhofer-Institut für Bauphysik: *IBP-Kurzbericht - Messtechnische und energetische Validierung des BMVBS-Effizienzhaus Plus in Berlin - Messperiode März 2012 bis Februar 2013*, Stuttgart

Hauer et al. 2013

Hauer, Andreas/ Hiebler, Stefan/ Reuß, Manfred: *Wärmespeicher*, 5. vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart, ISBN: 978-3-8167-8366-4

Hegger et al. 2013

Hegger, Manfred/ Fafflok, Caroline/ Hegger, Johannes/ Passig, Isabell: *Aktivhaus – Das Grundlagenwerk*, München, ISBN: 978-3-7667-1902-7

Koslik 2014

Koslik, Matthias: Fotos, in: Detail - Das Architekturportal (Hrsg.): *Wohnen im Schaufenster: Effizienzhaus Plus wiedereröffnet*, URL: <http://www.detail.de/architektur/news/wohnen-im-schaufenster-effizienzhaus-plus-wiedereroeffnet-021453.html> – Abgerufen am 06.03.2014

Manu 2014

Manu, Jan: *Foto*, URL: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Effizienzhaus-Plus,Berlin.JPG> – Abgerufen am 06.03.2014

Mertens 2013

Mertens, Konrad: *Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*, München, ISBN: 978-3-446-43410-3

Pöschk 2012

Pöschk, Jürgen: *Energieeffizienz in Gebäuden Jahrbuch 2012*, Berlin, ISBN: 978-3-936062-08-3

Quaschning 2009

Quaschning, Volker: *Regenerative Energiesysteme Technologie-Berechnung-Simulation*, 6. Aktualisierte Aufl., München, ISBN: 978-3-446-42151

Quaschning 2010

Quaschning, Volker: *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*, 2. Aktualisierte Aufl., München, ISBN: 978-3-446-41961-2

Quaschning 2013

Quaschning, Volker: *Regenerative Energiesysteme: Technologie-Berechnung-Simulation*, 8. Aktualisierte Aufl., München, ISBN: 978-3-446-43526-1

Schild/Brück 2010

Schild, Kai/ Brück, Henrik: *Energie-Effizienzbewertung von Gebäuden: Anforderungen und Nachweisverfahren gemäß EnEV 2009*, 1. Auflage, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-1211-7

Sobek 2011

Werner Sobek Stuttgart GmbH & Co. KG: *Baupläne des Effizienzhaus Plus*, Stuttgart

Erklärung

Ich versichere hiermit, die vorliegende Bachelorthesis mit dem Titel:

Optimierung der Produktion und Speicherung erneuerbarer Energien

am Beispiel des Effizienzhauses Plus in Berlin

selbstständig und nur mit denen von mir angegebenen Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Hamburg, den 19. März 2014

Rokahr, Jan

Anhang

Energieträger ^a		Primärenergiefaktoren f_p	
		insgesamt	nicht erneuerbarer Anteil
		A	B
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas H	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Nah-/Fernwärme aus KWK ^b	fossiler Brennstoff	0,7	0,7
	erneuerbarer Brennstoff	0,7	0,0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	erneuerbarer Brennstoff	1,3	0,1
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	2,4
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
	Solarenergie	1,0	0,0
Umweltenergie	Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0
	Umgebungswärme	1,0	0,0
	Umgebungskälte	1,0	0,0

^a Bezugsgröße Endenergie: Heizwert H_i .

^b Angaben sind typisch für durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %.

Abb. A-1 Primärenergiefaktoren in Analogie zur DIN V 18599 (Quelle: BMVI 2014)

Bosch Solar Module c-Si M 60 EU30014							
Länge [x]	Breite [y]	Rahmenhöhe [z]	Gewicht	Anschlussdose	Steckverbindertyp	Kabel [I]	Frontglasoberfläche
1660,0	990,0	50,0	21	Spelsberg	MC3	-800 +1200	strukturiert
x, y, l in mm, ±2; z in mm, ±0,3; Gewicht in kg ±0,5							
Kristallines Solarmodul							
Leistungsklassen			225 Wp, 230 Wp, 235 Wp, 240 Wp, 245 Wp				
Leistungssortierung			-0/+4,99 Wp				
Aufbau			Glas-Folie-Laminat ▶ Eloxiertes Aluminiumrahmen ▶ Anschlussdose (IP 65) mit 3 Bypass-Dioden ▶ Witterungsbeständige Rückseitenfolie (weiß)				
Zellen			60 Stück monokristalline Solarzellen im Format 156 mm x 156 mm				
Mechanische Belastbarkeit			5400 Pa Auflast, 2400 Pa Soglast, gemäß IEC 61215 (erweiterter Test)				
Elektrische Eigenschaften bei STC ¹ :							
Bezeichnung	P _{mpp} [Wp]	V _{mpp} [V]	I _{mpp} [A]	V _{oc} [V]	I _{sc} [A]	Rückstrombelastbarkeit I _r [A]	
M245 3BB	245	30,10	8,20	37,70	8,70	17	
M240 3BB	240	30,00	8,10	37,40	8,60	17	
M235 3BB	235	29,90	8,00	37,10	8,50	17	
M230 3BB	230	29,70	7,90	37,00	8,40	17	
M225 3BB	225	29,40	7,80	36,90	8,30	17	
Reduktion des Modulwirkungsgrades bei Rückgang der Bestrahlungsstärke von 1000 W/m ² auf 200 W/m ² (bei 25 °C): -0,33% (absolut); Messtoleranz P _{mpp} ±3%							
Montagehinweis:							
▶ Siehe Montage- und Betriebsanleitung unter: www.bosch-solarenergy.de							
▶ Montage in horizontaler und vertikaler Ausführung möglich							
▶ Systemspannung bis max. 1000 V							
▶ Betriebstemperaturbereich -40 bis 85 °C							
Schwachlichtverhalten:							
Intensität [W/m ²]	V _{mpp} [%]	I _{mpp} [%]					
800	0,0	-20					
600	0,0	-40					
400	-0,4	-60					
200	-3,2	-80					
100	-6,0	-90					
Die elektrischen Daten gelten bei 25 °C und AM 1,5.							
Thermische Eigenschaften:							
Temperaturkoeffizient	TK [%/K]						
P _{mpp}	-0,46						

Abb. A-2 Bosch M 235 3BB (vollständiges Datenblatt im elektronischen Anhang)

Charakteristik	
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Einhängen der werkseitig gefertigten Paneele in bauseitig auf Unterkonstruktion aufgebrachte Agraffenprofile auf der Baustelle
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • CIS-Dünnschicht PV-Modul • 4mm Deckglas (TVG) 3 mm Substratglas • verklebt auf 20 mm Trägerplatte aus Blähglasgranulat. Rückseitig mit Plattentragprofilen verschraubt • Stecker: MC PV-KB/KST4 • Anschlußdose: Serielle Solarbox • schwerentflammbar • geringes Gewicht • Elektrische Daten: • Nennleistung: 80 Wp ($\pm 10\%$) • Spannung im MPP: 35 V • Strom im MPP: 2,3 A • Leerlaufspannung: 44,02 V • Kurzschlußstrom: 2,5 A • Leerlaufspannung bei -10°C: 48,49 V • MPP-Spannung bei $+70^{\circ}\text{C}$: 29,48 V • Maximale Systemspannung: 1000 V • Rückstrombelastbarkeit: max 2x I_{sc} A • Maximal zulässige Modultemperatur -40 bis $+85^{\circ}\text{C}$ • Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung: $-0,29\%$/$^{\circ}\text{C}$ • Temperaturkoeffizient der Modulleistung: $-0,36\%$/$^{\circ}\text{C}$ • Temperaturkoeffizient des Kurzschlussstromes: $0,05\%$/$^{\circ}\text{C}$
Format	<ul style="list-style-type: none"> • Standardformat B x H: 0,60 x 1,20 m bzw. 1,20 x 0,60 m • Paneldicke ohne Plattentragprofil 32 mm (Toleranz $+ 0$ mm - 2 mm) • Gewicht ca. 32 kg/m² • Sondermaße auf Anfrage

Abb. A- 3 StoVentec ARTline (vollständiges Datenblatt in elektronischem Anhang)

-weishaupt-		Montage- und Betriebsanleitung WWP L 8 IK	
11 Geräteinformation			
11 Geräteinformation			
1 Typ- und Verkaufsbezeichnung	WWP L 8 IK		
2 Bauform			
2.1 Ausführung	Kompakt		
2.2 Schutzart nach EN 60 529 für Kompaktgerät bzw. Heizelement	IP 20		
2.3 Aufstellungsort	Innen		
3 Leistungsangaben			
3.1 Temperatur-Betriebseinsatzgrenzen:			
Heizwasser-Vorlauf / -Rücklauf	$^{\circ}\text{C} / ^{\circ}\text{C}$	bis 58 / ab 18	
Luft	$^{\circ}\text{C}$	-25 bis +35	
3.2 Heizwasser-Temperaturpreizung bei A7 / W35		10,0	5,0
3.3 Wärmeleistung / Leistungszahl bei A-7 / W35 ¹	kW / ---	5,8 / 2,7	5,5 / 2,6
	bei A-7 / W45 ¹		5,4 / 2,1
	bei A2 / W35 ¹	7,5 / 3,3	7,4 / 3,2
	bei A7 / W35 ¹	9,3 / 3,9	9,2 / 3,8
	bei A7 / W45 ¹		8,8 / 3,2
	bei A10 / W35 ¹	9,8 / 4,1	9,7 / 4,0
3.4 Schall-Leistungspegel Gerät / Aussen	dB(A)	53 / 60	
3.5 Schall-Druckpegel in 1m Entfernung (Innen)	dB(A)	48,0	
3.6 Heizwasserdurchfluss bei interner Druckdifferenz ²	m ³ /h / Pa	0,8 / 2700	1,6 / 11900
3.7 Freie Pressung Heizungsumwälzpumpe (max. Stufe)	Pa	45000,0	

Abb. A- 4 Weishaupt WWP L 8 IK (vollständiges Datenblatt in elektronischem Anhang)

3 Produktbeschreibung

3.4 Technische Daten

3.4.1 Zulassungsdaten

	WAC 300	WAC 400	WAC 500
DIN CERTCO	9W247-13MC	9W247-13MC	9W247-13MC
SVGW	0808-5407	0808-5407	0808-5407

3.4.2 Leistung

	WAC 300	WAC 400	WAC 500
Bereitschaftsverlust bei 45 K	2,2 kWh/24 h	2,4 kWh/24 h	2,5 kWh/24 h
Speicherkapazität (60 °C)	14,1 kWh	19,3 kWh	22,1 kWh
Dauerleistung	80/10/60 °C - 3,0 m³/h 70 kW	90 kW	102 kW
Zapfmenge	80/10/60 °C - 3,0 m³/h 1200 l/h	1550 l/h	1740 l/h
Leistungskennzahl ⁽¹⁾	80/10/60 °C - 3,0 m³/h 10,5	14,6	17,7
Kurzzeitleistung ⁽¹⁾	80/10/60 °C - 3,0 m³/h 420 l/10 min	500 l/10 min	560 l/10 min

⁽¹⁾ bezieht sich auf angegebene Dauerleistung.

Abb. A- 5 Weishaupt WAC 300 (vollständiges Datenblatt in elektronischem Anhang)

Elektrische Daten (bei STC)

	VBHN240SE01	VBHN235SE01
Nennleistung (Pmax) [W]	240	235
Spannung, max. (Vmp) [V]	43.7	43.0
Stromstärke, max. (Imp) [A]	5.51	5.48
Leerlaufspannung (Voc) [V]	52.4	51.8
Kurzschlussstrom (Isc) [A]	5.85	5.84
Überstromschutz, max. [A]	15	
Leistungstoleranz [%]	+10/-5*	
Maximale Systemspannung [V]	1000	

Hinweis: (STC) Standard Test Bedingungen: Luftmasse 1,5; Einstrahlung = 1000 W/m²; Zelltemp. 25 °C
* Alle Module weisen bei Messungen durch die Panasonic Produktionsstätte positive Toleranzen auf

Temperatureigenschaften

Temperatur [NOCT] [°C]	44.0	44.0
Temperaturkoeffizient von Pmax [%/°C]	-0.30	-0.30
Temperaturkoeffizient von Voc [V/°C]	-0.131	-0.130
Temperaturkoeffizient von Isc [mA/°C]	1.76	1.75

Bei NOCT

Nennleistung (Pmax) [W]	182	179
Spannung, max. (Vmp) [V]	41.1	40.5
Stromstärke, max. (Imp) [A]	4.44	4.41
Leerlaufspannung (Voc) [V]	49.4	48.9
Kurzschlussstrom (Isc) [A]	4.71	4.70

Hinweis: (NOCT) Nominale Betriebstemperatur der Zellen: Luftmasse 1,5 Spektrum; Einstrahlung 800W/m²; Lufttemperatur 20 °C; Windgeschwindigkeit 1m/s

Bei geringer Einstrahlung

Nennleistung (Pmax) [W]	45.9	44.7
Spannung, max. (Vmp) [V]	41.7	41.0
Stromstärke, max. (Imp) [A]	1.10	1.09
Leerlaufspannung (Voc) [V]	49.0	48.4
Kurzschlussstrom (Isc) [A]	1.17	1.17

Hinweis: Geringe Einstrahlung: Luftmasse 1,3; Einstrahlung = 200 W/m²; Zelltemperatur = 25 °C

Abmessungen und Gewicht

Vorderside Seitenansicht Rückseite

Gewicht: 15 kg
Gewicht/m²: 11,9 kg/m²
Einheit: mm

Garantie
Leistungsgarantie: 10 Jahre (auf 90% von Pmin), 25 Jahre (auf 80% von Pmin)
Produktgarantie: 10 Jahre (basierend auf dem Garantiedokument)

Material
Material der Zellen: 5 Zoll HIT Zellen
Material Glas: AR beschichtetes Hartglas
Material Rahmen: schwarz eloxiertes Aluminium
Steckertyp: MC3 oder SMK

Zertifikate

Mitglied von **PV CYCLE**

Abb. A- 6 Sanyo VBHN 240 SE 01 (vollständiges Datenblatt in elektronischem Anhang)

Electrical Specifications

MODEL NUMBERS AND RATINGS AT STC ¹ *						
Nominal Values		FS-382	FS-385	FS-387	FS-390	FS-392
Nominal Power(+/-5%)	$P_{MPP}(W)$	82.5	85.0	87.5	90.0	92.5
Voltage at P_{MAX}	$V_{MPP}(V)$	48.3	46.4	47.0	47.4	47.7
Current at P_{MAX}	$I_{MPP}(A)$	1.71	1.83	1.86	1.90	1.94
Open Circuit Voltage	$V_{OC}(V)$	60.8	60.5	60.5	60.5	60.5
Short Circuit Current	$I_{SC}(A)$	1.94	1.94	1.99	2.06	2.11
Maximum System Voltage	$V_{SYS}(V)$					1000
Limiting Reverse Current	$I_R(A)$					3.5
Maximum Series Fuse	$I_{CF}(A)$					3.5

TEMPERATURE CHARACTERISTICS		
Nominal Values		
Temperature Coefficient of P_{MPP}	$T_K(P_{MPP})$	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of V_{OC} , high temp (>25°C)	$T_K(V_{OC, high temp})$	-0.27%/°C
Temperature Coefficient of V_{OC} , low temp (-40°C to +25°C)	$T_K(V_{OC, low temp})$	-0.20%/°C
Temperature Coefficient of I_{SC}	$T_K(I_{SC})$	+0.04%/°C

Mechanical Drawing

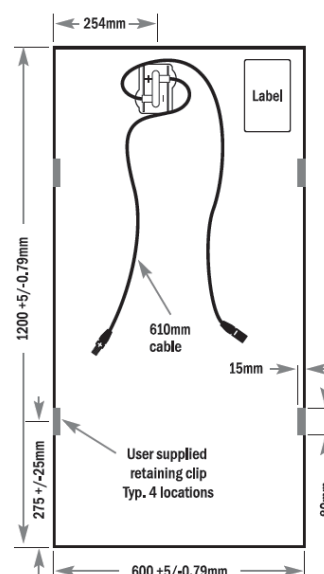


Abb. A- 7 First Solar FS 392 (vollständiges Datenblatt in elektronischem Anhang)

		AQUA PLASMA 19/34	AQUA PLASMA 19/50
Anzahl der Vakuum-Röhren	Stk	14	21
Jährlicher Kollektorsertrag Solar Keymark*	kWh/a	2.225	3.338
Rastermaße (L x B x H)	mm	2.058 x 1.628 x 110	2.058 x 2.433 x 110
Bruttofläche	m ²	3,35	5,01
Montagegewicht	kg	50	73

* Nachweis: Solar Keymark, Anhang zum Zertifikat 011-75 1889 R (Standort Würzburg, mittlere Kolleortemperatur 50 °C)

Abb. A- 8 Paradigma AQUA PLASMA 19/34 (vollständiges Datenblatt in elektronischem Anhang)