

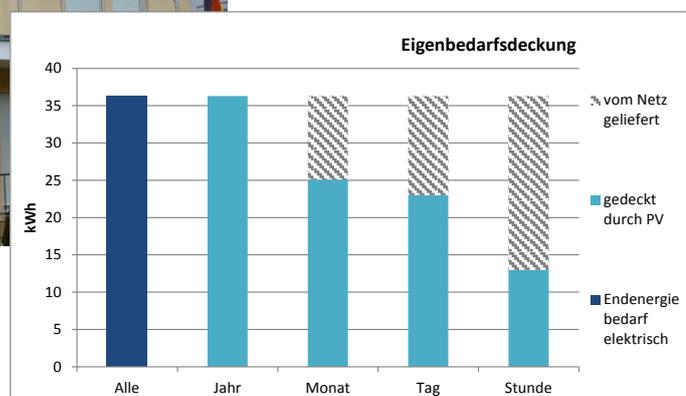


TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
Fachbereich Bauingenieurwesen
Institut für Massivbau
Fachgebiet Massivbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de>

INSTITUT WOHNEN
UND UMWELT GmbH
Forschungseinrichtung
des Landes Hessen
und der Stadt Darmstadt
www.iwu.de

Milena Frank

Analyse der Eigenbedarfsdeckung durch PV- und KWK-Anlagen in Wohnhäusern



Darmstadt 2015

Aufbereitete Fassung* der gleichnamigen Bachelor-Thesis
am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, eingereicht im August 2014

Verfasser: B.Sc. Milena Frank

Betreuer: M.Sc. Claudia Weißmann

Anschrift:
Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau
Franziska-Braun-Straße 3
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

In Kooperation mit: Institut Wohnen und Umwelt GmbH

Betreuer: Margrit Schaede, Tobias Loga

Anschrift:
Rheinstraße 65
64295 Darmstadt

<http://www.iwu.de>

ISBN: 978-3-941140-48-6

IWU-Bestellnummer: 06/15

**) formell und redaktionell leicht überarbeitete Fassung, inhaltliche Punkte sind unverändert.*



**Wer wendet sein Gesicht nicht gerne der Zukunft zu,
wie die Blumen ihre Kelche der Sonne?**

Heinrich von Kleist

Kurzfassung

Im Zusammenhang mit den Bestrebungen die CO₂ Emissionen in Gebäuden zu reduzieren und im Rahmen der Diskussion um „Zero-Energy Buildings“ (ZEB) kommt der Frage, welcher Anteil des Gebäudeenergiebedarfs durch direkt am Gebäude erzeugten Strom gedeckt werden kann, eine steigende Bedeutung zu. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein umfangreiches Tabellenwerk präsentiert, das es für ein breites Anwendungsspektrum ermöglicht, den Eigenbedarfsdeckungsanteil in Abhängigkeit des Verhältnisses von Stromproduktion zu Strombedarf zu ermitteln. Dabei wird für 3 Wohngebäudetypen mit Photovoltaikanlagen, für unterschiedliche Wärmeschutzstandards und unterschiedliche Anlagentechniken (Wärmepumpe, Kraft-Wärme-Kopplung, Brennwertkessel, Lüftungsanlage) der Eigenbedarfsdeckungsanteil analysiert. Zusätzlich zur üblichen Bilanzierung gemäß EnEV 2014 wird in dieser Arbeit ein selbst entwickeltes Verfahren zur exemplarischen Erzeugung von Tages- und Stundenprofilen für die Stromerzeugung und den Stromverbrauch vorgestellt, das die Verrechnung auf Stundenebene ermöglicht. Weiterhin erlaubt das Verfahren in Abweichung zur EnEV 2014 die Berücksichtigung von Haushaltsstrom bei der Bilanzierung. Die Ermittlung der Eigenbedarfsdeckungsanteile mit dem in dieser Bachelor-Arbeit beschriebenen und umgesetzten Verfahren bietet somit eine sinnvolle Ergänzung zur Energiebilanzierung gemäß EnEV und kann im Rahmen von weiterführenden Modelfall-Betrachtungen und Szenarien-Analysen genutzt werden.

Abstract

Due to the effort to significantly reduce the CO₂ emission of buildings and in the context of the discussions regarding “Zero-Energy Buildings” (ZEB) the use of renewable energy produced directly at the buildings to cover the energy needs becomes increasingly important. This bachelor thesis contains a comprehensive set of tables that enables the estimation of the part of the energy consumption that can be covered by electricity produced from renewable energy sources on site. This fraction of the self-produced electricity used to satisfy own demand (load match) is presented as a function of the ratio between electricity production and electricity demand. This fraction is analyzed for three different building types with photovoltaic systems, different thermal insulation scenarios and different heat supply systems (thermal heat pump, combined heat and power systems, condensing boiler, ventilation system). In addition to the monthly energy balance used in the current German requirements and calculation standard EnEV 2014, a special approach has been chosen to generate daily and hourly electricity demand patterns. This enables the energy balance at the daily/hourly level and thus reveals new insights. In addition the approach also takes regular household electricity into consideration. The determination of the load match, using the approach developed and implemented as part of this bachelor thesis, provides a useful addition to the monthly energy balancing according to EnEV 2014 and may be used in further models and scenario analysis regarding the load match.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS..... III

TABELLENVERZEICHNIS..... IV

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS V

1 EINLEITUNG..... 1

2 GRUNDLAGEN..... 3

2.1 Anlagentechnik.....3

 2.1.1 Photovoltaik Anlagen.....3

 2.1.2 Kraft-Wärme-Kopplung.....4

 2.1.3 Wärmepumpe5

2.2 Zero-Energy Buildings7

3 BESCHREIBUNG DER METHODIK..... 10

3.1 Grundlagen des Eigenbedarfsdeckungsanteils10

 3.1.1 Grundsätze 11

 3.1.2 Verrechnungsraum 13

 3.1.3 Verrechnungsschrittweite 15

3.2 Eigene Umsetzung16

 3.2.1 Eigenbedarfsdeckungstool (EBD-Tool)17

 3.2.2 Konzepte zur Datenbeschaffung der Monatswerte19

 3.2.2.1 Photovoltaik19

 3.2.2.2 Kraft-Wärme-Kopplung21

 3.2.2.3 Heizung.....22

 3.2.2.4 Warmwasser23

 3.2.2.5 Haushaltsstrom23

 3.2.3 Konzepte zur exemplarischen Erzeugung von Stundenwerten24

 3.2.3.1 Photovoltaik24

 3.2.3.2 Kraft-Wärme-Kopplung25

 3.2.3.3 Heizung.....25

 3.2.3.4 Warmwasser28

 3.2.3.5 Haushaltsstrom31

3.2.4	Getroffene Vereinfachungen	32
3.2.5	Darstellung der Ergebnisse	32
4	DURCHFÜHRUNG DER ANALYSE	34
4.1	Basisvariante	36
4.1.1	EnEV-Software	36
4.1.2	Analyse im EBD-Tool	38
4.1.3	Ergebnisse der Basisvariante.....	39
4.2	Parametervariation	50
4.2.1	Einfluss des Wärmeschutzstandards	51
4.2.2	Einfluss der Anlagentechnik	52
4.2.3	Einfluss des Gebäudetyps.....	54
5	INTERPRETATION UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE	56
5.1	Eigenbedarfsdeckung	56
5.2	Diskussion des methodischen Vorgehens	57
5.3	Anwendungsfelder	58
5.4	Weiterführende Betrachtung.....	59
6	FAZIT	63
	GLOSSAR	66
	LITERATURVERZEICHNIS	70
	ANHANG	1
	Anhang A: Eingabe Basisvariante in ZUB Helena	1
	Anhang B: Eingabe im „Data Boy“	5
	Anhang C: Tabellenwerte des Eigenbedarfsdeckungsanteils	6

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zero-Energy Buildings	7
Abbildung 2: Umsetzung der Aufgabenstellung	16
Abbildung 3: Standardwerte PV-Systeme.....	20
Abbildung 4: Modifikation der ZUB-HELENA-Einstellungen zur Ermittlung der Monatswerte des Endenergiebedarfs einer KWK-Anlage: Ausschalten der Stromerzeugung für die Zwischenberechnung	21
Abbildung 5: Wochengang Heizbedarf: Passivhaus und Altbau	27
Abbildung 6: Wochengang Raumtemperatur: Passivhaus und Altbau.....	27
Abbildung 7: Warmwasser Messdaten Lummerlund.....	30
Abbildung 8: Vergleich der Messdaten	30
Abbildung 9: Messdaten Haushaltsstrom Winter	31
Abbildung 10: Messdaten Haushaltsstrom Sommer	32
Abbildung 11: Gebäudetypen gemäß IWU Projekt EPISCOPE	34
Abbildung 12: Bilanz nach ZUB Helena für Basisvariante	38
Abbildung 13: Monatswerte Basis 1.....	40
Abbildung 14: Monatswerte Basis 2.....	40
Abbildung 15: Wochenverlauf Strombedarf und -erzeugung Sommer Basis 1	41
Abbildung 16: Wochenverlauf Sommer Basis 2.....	41
Abbildung 17: Stundenverlauf Basis 1 - Winter (trüb)	42
Abbildung 18: Stundenverlauf Basis 1 - Winter (sonnig).....	42
Abbildung 19: Stundenverlauf Basis 2 - Winter (trüb)	43
Abbildung 20: Stundenverlauf Basis 2 - Winter (sonnig).....	43
Abbildung 21: Säulendiagramm Basis 1	44
Abbildung 22: Säulendiagramm Basis 2	45
Abbildung 23: Säulendiagramm Energiekennwerte pro m ² beheizte Wohnfläche Basis 1.....	45
Abbildung 24: Ergebnisgrafik Basis 1 (ohne Haushaltsstrom)	47
Abbildung 25: Ergebnisgrafik Basis 2 (mit Haushaltsstrom)	47
Abbildung 26: Parametervariation Wärmeschutz.....	51
Abbildung 27: Parametervariation Anlagentechnik	52
Abbildung 28: Basis 2 mit BHKW.....	53
Abbildung 29: Parametervariation Gebäudetyp	54

Abbildung 30: Eigenbedarfsdeckung Basis 2 (EFH mit Haushaltsstrom) für unterschiedliche Verrechnungsschrittweiten.....	56
Abbildung 31: Entwicklung der Strompreise und der Vergütungen für eingespeisten PV-Strom / Netzparität.....	59
Abbildung 32: Auswirkung des Einsatzes eines elektrischen Energiespeichers für den Tag-Nacht Ausgleich auf den stündlichen Eigenbedarfsdeckungsanteil....	61
Abbildung 33: Anlagenparameter der Wärmepumpe der Basisvariante	A-2
Abbildung 34: Gebäudeergebnisse Basisvariante	A-3
Abbildung 35: Strom aus erneuerbaren Energien Basisvariante	A-4
Abbildung 36: Excel Ergebnisbericht Basisvariante.....	A-5
Abbildung 37: Eingabefeld Databoy.....	A-6

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verrechnungsräume.....	13
Tabelle 2: Verrechnungsschrittweite	15
Tabelle 3: Tabellenblatt "monatlich"	18
Tabelle 4: U-Werte nach Standard	35
Tabelle 5: Eckdaten Basisvariante.....	36
Tabelle 6: Verwendete Ergebnisse für Basisvariante aus ZUB Helena	37
Tabelle 7: Jahresergebnisse nach Verrechnungsschrittweite Basis 1	43
Tabelle 8: Jahreswerte nach Verrechnungsschrittweite Basis 2.....	44
Tabelle 9: Variation der Größe der PV-Anlage	46
Tabelle 10: Tabellenwerte Basis 1 + 2.....	49
Tabelle 11: Bezeichnungs-Code der Variationsparameter	A-7
Tabelle 12: Tabellenwerte alle Varianten mit Haushaltsstrom	A-10
Tabelle 13: Tabellenwerte alle Varianten ohne Haushaltsstrom	A-12

Abkürzungsverzeichnis

akt.	aktualisiert
Anm.	Anmerkung
Aufl.	Auflage
BHKW	Blockheizkraftwerk
bzw.	beziehungsweise
CdTe	Cadmium-Tellurid
CIS	Kupfer-Indium-Selen
ca.	circa
ct	Cent
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN V	DIN Vornorm
EBD-Tool	Eigenbedarfsdeckungstool
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPISCOPE	Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks
et al.	et alii
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
e.V.	eingetragener Verein
EVU	Energieversorgungsunternehmen
ggf.	gegebenenfalls
H	Heizung
Hg.	Herausgeber
HJ	Halbjahr
HStrom	Haushaltsstrom
ISO	Internationale Organisation für Normung
IWU	Institut Wohnen und Umwelt GmbH

Abkürzungsverzeichnis

Jg.	Jahrgang
Kap.	Kapitel
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
MFH	Mehrfamilienhaus
nZEB	Nearly Zero-Energy Buildings
NetZEB	Net Zero-Energy Buildings
o.J.	ohne Jahresangabe
o.V.	ohne Verfasser
PDF	Portable Document Format
prEN	Europäische Norm im Entwurfsstadium
PV	Photovoltaik
RH	Reihenhaus
S.	Seite
TABULA	Typology Approach for Building Stock Energy Assessment
techn.	technische
TRY	Testreferenzjahr
TWh	Terrawattstunde
u.a.	unter anderen
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
vollst.	vollständig
vs.	versus
WLA	Wohnungslüftungsanlage
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
z.B.	zum Beispiel
ZUB Helena	Programm für energetische Bilanzierung
zugl.	zugelassene
z.Zt.	zur Zeit

1 Einleitung

In Deutschland fallen 40% des gesamten Energiebedarfs auf den Bereich Wohnen. Daher ist es an dieser Stelle besonders wichtig, nachhaltige Maßnahmen für eine gesicherte Energieversorgung in der Zukunft zu treffen.

Bis 2050 sollen, laut Energiekonzept der Bundesregierung¹, die CO₂-Emissionen im Gebäudesektor um 80% reduziert werden. Um dies zu erreichen soll die Sanierungsrate bis zu diesem Zeitpunkt von 1% auf 2% verdoppelt werden. Die neue Energieeinsparverordnung „EnEV 2014“, welche seit Mai 2014 gültig ist, stellt die Anforderungen an energieeffizientes Bauen dar. Ziel ist es auf einen klimaneutralen Gebäudebestand hinzuarbeiten. Der Energiebedarf von Bestandsgebäuden und Neubauten kann durch Wärmeschutzmaßnahmen und effiziente Anlagentechnik erheblich gesenkt werden. Um die Ziele der Bundesregierung zu erreichen, ist es zusätzlich notwendig, einen möglichst hohen Anteil des verbleibenden Restbedarfs durch erneuerbare Energien oder andere Anlagen zur Eigenstromerzeugung zu decken.

Im Folgenden wird untersucht, welcher Eigenbedarfsdeckungsanteil des verbleibenden Energiebedarfs mittels Photovoltaikanlagen und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen bei Wohngebäuden erreicht werden kann.

Im einführenden Kapitel 2 werden wichtige Grundlagen, zum Verständnis der untersuchten Anlagen zur regenerativen Stromerzeugung erläutert.

Das methodische Vorgehen wird in Kapitel 3 der Arbeit beschrieben. Es geht dabei um die Verrechnung der Stromproduktion mit dem Strombedarf, welche jahres-, monats-, tages- und stundengenau vorgenommen wird. Um diese Untersuchung durchführen zu können, ist es notwendig das Bedarfsprofil für den Energieverbrauch einer Wohneinheit bis auf die stundengenaue Ebene synthetisch anhand exemplarisch erzeugter Stundenprofile darstellen zu können.

In Kapitel 4 wird darauf aufbauend analysiert, inwieweit der erreichbare Eigenbedarfsdeckungsanteil abhängig von der Verrechnungsschrittweite ist. Das Vorgehen wird dabei exemplarisch an einer bestimmten Auswahl der zu variierenden Parameter vorgeführt und deren Ergebnisse dargestellt. Der Eigenbedarfsdeckungsanteil ($\alpha_{el,prod}$) wird darin als Funktion des Verhältnisses von Stromproduktion zu Strombedarf (γ_{el}) dargestellt. Im Kapitel 4.2 wird untersucht, wie sich der Eigenbedarfsdeckungsanteil bei der Variation verschiedener Parameter verändert. Variiert werden die Kenngrößen Wärmeschutzstandard, Anlagentechnik und Gebäudetyp.

Die Interpretation der Ergebnisse wird in Kapitel 5 dargestellt und diskutiert.

In Anhang C werden sämtliche, durch das im Rahmen der Arbeit selbst entwickelte Eigenbedarfsdeckungstool (EBD-Tool) erzeugten Werte aufgeführt. Auf Basis dieser

¹<http://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/ma%C3%9Fnahmen-im-ueberblick.html> (Zugriff am 11.08.14).

Tabellen lässt sich der Eigenbedarfsdeckungsanteil für einen relevanten Ausschnitt der in Kapitel 4.2 erläuterten Parameter anhand des Verhältnisses von Stromproduktion zu Strombedarf einfach abschätzen. Diese Tabellen können für weiterführende Modellfall-Betrachtungen und Szenarien-Analysen herangezogen werden.

Zentrale Fragestellung der Arbeit ist also, welcher Eigenbedarfsdeckungsanteil bei Wohnhäusern durch die Stromproduktion am Haus erreicht werden kann und wie dieser von der Verrechnungsschrittweite und anderen Parametern wie Wärmeschutzstandard, Anlagentechnik und Gebäudetyp abhängig ist.

2 Grundlagen

2.1 Anlagentechnik

2.1.1 Photovoltaik Anlagen

Technische Grundlagen

Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen) wandeln Sonnenenergie in Elektrizität um. Dies geschieht mithilfe des photoelektrischen Effekts. Im Einzelnen besteht eine PV Anlage aus vielen Solarzellen. Eine Solarzelle wiederum besteht aus einem n- und einem p-dotierten Halbleiter. „Im n-Halbleiter existiert [...] ein Überschuss an freien Elektronen, im p-Halbleiter ein Überschuss an freien Löchern“². Dadurch entsteht ein pn-Übergang, das heißt, dass die Elektronen vom n ins p-Gebiet diffundieren und die Löcher vom p ins n Gebiet. Es entsteht ein elektrisches Feld. Trifft Sonnenstrahlung, also einzelne Photonen, auf die Solarzelle, werden durch diese Energie Elektronen gelöst. Diese wandern durch das elektrische Feld in das n-Gebiet, die dadurch entstehenden Löcher in das p-Gebiet. An den Kontakten der Solarzelle entsteht nun eine Spannung von ungefähr 0,5 Volt³.

Aufgrund dieser niedrigen Spannungen werden Solarzellen in Modulen in Reihe geschaltet, wodurch gut nutzbare Spannungen von 20 bis 50 Volt entstehen⁴. Mehrere Module bilden dann in Parallel- oder Reihenschaltung eine Photovoltaik Anlage.

Arten von PV-Zellen

Die Nennleistung eines Solarmoduls wird in kW_p angegeben. Diese ist neben der Sonneneinstrahlung und der Temperatur von dem Material der Solarzellen abhängig. Grob unterteilen lassen sich die Arten von Solarzellen in kristalline Zellen und Dünnschichtzellen. Die kristallinen Zellen sind zum Beispiel Monokristallines Silizium und Polykristallines Silizium. Der Wirkungsgrad von monokristallinen Zellen ist mit 15-20% am höchsten. Im Laborbetrieb ist sogar ein Wirkungsgrad von 33% zu erreichen⁵. Die Dünnschichtzellen bestehen beispielsweise aus amorphem Silizium, Kupfer-Indium-Selen (CIS) oder Cadmium-Tellurid (CdTe). Die Wirkungsgrade liegen zwischen 6-12%. Die Vorteile der Dünnschichtzellen sind „der wesentlich geringere Materialeinsatz und die geringeren Herstellungskosten. Aus diesen Gründen wird vor allem den Dünnschichtzellen ein großes Entwicklungspotential zugeschrieben.“⁶

² Quaschnig (2007/08), S.157.

³ Vgl. Mertens (2013), S.30.

⁴ Vgl. Mertens (2013), S.30.

⁵ Vgl. Hegger (2013), S.160.

⁶ Quaschnig (2007/08), S.163.

Nachteile ergeben sich allerdings aufgrund der Verfügbarkeit und der Produktionssicherheit der toxischen Materialien.⁷

Einsatz in Deutschland

Aufgrund der Einspeisevergütung durch das EEG ist die Installation von PV-Anlagen in Deutschland in den letzten Jahren stark gestiegen. Die installierte Leistung in Deutschland lag Anfang 2013 bei 30 TWh, das entspricht ungefähr 5,7 % des Nettostromverbrauchs in Deutschland.⁸ Der anfängliche Vergütungssatz lag im April 2012 bei 19,50 ct. Durch die monatliche Degression der Vergütung von durchschnittlich 1 % sinkt der Vergütungssatz. Im August 2014 installierte kleine Dachanlagen bis 10 kWp⁹ erhalten dadurch z. B. nur noch eine Vergütung von 12,75 ct.

2.1.2 Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme. Dadurch „kann der eingesetzte Brennstoff sehr viel effizienter genutzt werden, als bei der herkömmlichen Produktion in getrennten Anlagen.“¹⁰ Aufgrund der Energieeinsparung und des Klimaschutzes genießt die KWK „in Fachkreisen einen sehr hohen Stellenwert und bei Behörden und in der Öffentlichkeit eine ungeteilte Zustimmung.“¹¹

Blockheizkraftwerk

Die Umsetzung der KWK in den privaten Haushalten stellt das Blockheizkraftwerk (BHKW) dar. Dies ist ein kompaktes Motor-Heizkraftwerk. Es besteht aus einem Motor und dem vom Motor angetriebenen Generator, der elektrische Energie erzeugt.¹²

Eingesetzte Brennstoffe sind unter anderem:

- Erdgas
- Flüssiggas
- Heizöl

⁷ Vgl. Quaschnig (2007/08), S. 163.

⁸ Wirth (2014), S.5.

⁹ Vgl. Veröffentlichung der Bundesnetzagentur:

http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1422/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/ArchivDatenMeldgn/ArchivDatenMeldgn_node.html (Zugriff am 06.08.14).

¹⁰ http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/ (Zugriff am 09.08.14).

¹¹ Suttor/Johler/Weisenberger (2009), S. 5.

¹² Vgl. Suttor/Johler/Weisenberger (2009).

- Biodiesel
- Rapsöl
- Biomethan

Für den Gebrauch in Einfamilienhäusern spricht man von Mini-BHKWs, die eine Leistung von bis zu 20 kW_{el} aufweisen.¹³ Der elektrische Wirkungsgrad dieser Mini-BHKWs liegt bei ca. 25-35% und der Wirkungsgrad der Wärmeerzeugung bei 50-60%. Insgesamt liegt der Nutzungsgrad damit bei 80-90 %.¹⁴

Das BHKW wird in den meisten Fällen wärmegeführt betrieben, da sich die Anlage nur dann energetisch sinnvoll betreiben lässt, wenn die Wärme im Gebäude zeitnah gebraucht wird.¹⁵ Des Weiteren wird unterschieden zwischen einer monovalenten oder bivalenten Betriebsweise. Bei bivalenter Betriebsweise wird das BHKW mit einem Spitzenlastkessel und einem Pufferspeicher kombiniert.

Die Wirtschaftlichkeit eines BHKW wird durch die jährliche Laufzeit, die Investitionskosten, das Verhältnis vom Gas- zum Strompreis und die Stromeinspeisevergütungen bestimmt.¹⁶ Als Mindestlaufzeit wird ein Wert von 4000 h/a für den wirtschaftlichen Einsatz angenommen.¹⁷

Einsatz in Deutschland

Das KWKG-Gesetz (KWKG) unterstützt seit 2009 den Ausbau der KWK in Deutschland. Demnach bekommt der Betreiber einer KWK-Anlage vom Stromnetzbetreiber über einen bestimmten Zeitraum einen Zuschlag für den erzeugten Strom bezahlt. Außerdem zahlt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) einen Investitionszuschlag an den Anlagenbetreiber für Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis zu 20 kW.¹⁸

2.1.3 Wärmepumpe

Die elektrische Wärmepumpe (WP) erzeugt aus zugeführtem Strom und Umweltwärme zum Heizen und zur Warmwasserbereitung nutzbare Wärme. Die Quellen der benötigten Umweltwärme sind beispielsweise Grundwasser (Wasser/Wasser), Außenluft (Luft/Wasser), Abluft der Wohnungslüftung (Luft/Wasser) und das Erdreich (Sole/Wasser). Bei letztgenanntem finden zwei verschiedene Methoden, Erdkollektoren oder Erdwärmesonden, Verwendung.

¹³ Vgl. http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/mini_kwk_anlagen/index.html (Zugriff am 13.01.15).

¹⁴ Vgl. Fisch, Wilken, Stähr (2011), S.136.

¹⁵ Voss, Musall (2011), S. 29.

¹⁶ Vgl. Fisch, Wilken, Stähr (2011), S.138.

¹⁷ Vgl. Fisch, Wilken, Stähr (2011), S.136.

¹⁸ Vgl. http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/ (Zugriff am 09.08.14).

Die Methode der Energiegewinnung folgt bei allen Quellen der Umkehrung des Prinzips der Wärmekraftmaschine. Durch die Wärmepumpe fließt ein Kältemittel, welches bei niedriger Temperatur der Umweltquelle (Wärmequelle) Wärme entzieht und diese bei einer hohen Temperatur in die Heizung oder das Trinkwarmwasser (Wärmesenke) abgibt. Je kleiner das Gefälle zwischen der Temperatur der Wärmequelle und der Wärmesenke ist, desto größer ist die Leistung der Wärmepumpe. Darum sollte die Wärmepumpe nur bei Niedrigtemperatur-Heizsystemen, wie einer Fußbodenheizung eingesetzt werden.¹⁹

Die Temperatur im Erdreich bleibt nahezu konstant und ist im Winter in der Regel höher als die Außenlufttemperatur. Dadurch ist das Gefälle zwischen der Temperatur der Wärmequelle und der Wärmesenke bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe über das Jahr gesehen nahezu konstant. Die Jahresarbeitszahl, also das Verhältnis der Wärmeleistung zur Stromleistung, ist daher höher als bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe. Dies ist bei der Bewertung der energetischen Effizienz der verschiedenen Betriebsweisen ausschlaggebend.

Eine Wärmepumpe arbeitet in Wohnhäusern zum Heizen und zur Warmwasserbereitung entweder monovalent, d.h. als alleiniger Wärmeerzeuger, oder bivalent, d.h. in Kombination mit einem zweiten Wärmeerzeuger.²⁰ Das Betreiben einer Wärmepumpe bietet sich in Kombination mit einer PV-Anlage an, da der produzierte Strom der PV-Anlage für den Betrieb der Wärmepumpe genutzt werden kann.

Einsatz in Deutschland

Es werden in ca. 25% der neu gebauten Wohnhäuser Wärmepumpen integriert. Im europäischen Vergleich besitzt Deutschland zwar einen stabilen Wärmepumpenmarkt, trotzdem ist der Wert aber im Vergleich zu Skandinavien, wo dieser Anteil 80% beträgt, relativ gering. Überwiegend verkauft werden mittlerweile Luft/Wasser-Wärmepumpen. Grund dafür sind zum einen der hohe Aufwand für das Genehmigen von Erdwärmesonden, zum anderen arbeiten Erdwärmesonden zwar effizienter, sind aber auch teurer als Luft/Wasser-Wärmepumpen. Der Einsatz von Wärmepumpen ist vorwiegend für energieeffiziente Gebäude vorgesehen. Für den Einsatz in Bestandsgebäuden werden hohe Systemtemperaturen erforderlich, um den hohen Heizenergiebedarf abzudecken. Mittlerweile kommt aber auch der Einsatz von WP in Bestandsgebäuden vor, was mittels bivalenter Betriebsweise oder Hochtemperaturwärmepumpen umgesetzt werden kann.²¹

¹⁹ Vgl. Fisch, Wilken, Stähr (2011), S.132..

²⁰ Vgl. Fisch, Wilken, Stähr (2011), S.131.

²¹ Vgl. Miara et. al., S.16.

2.2 Zero-Energy Buildings

Unter einem „Zero-Energy Building“ (ZEB) wird im Allgemeinen ein an das Netz angeschlossenes, energieeffizientes Gebäude verstanden, das in Bezug auf ein Jahr so viel Energie am Haus selbst erzeugt, wie es verbraucht.²² Es existieren weltweit verschiedene Definitionen und Umsetzungsvorschläge für das Erreichen einer ausgeglichenen Jahresbilanz. Dabei fallen, um den Unterschied zum autarken Gebäude hervorzuheben, die Bezeichnungen „Net Zero-Energy Building“, „Nearly Zero-Energy Building“ und „Net Plus Energy Building“²³. In Abbildung 1 sind die Unterschiede dargestellt.

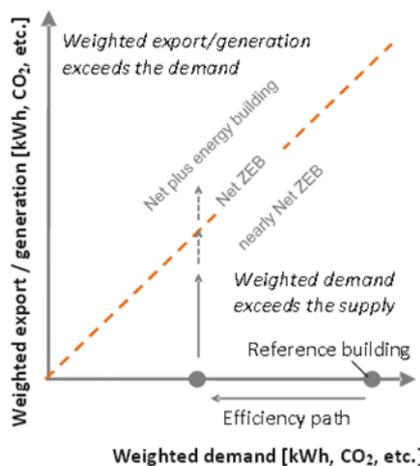


Abbildung 1: Zero-Energy Buildings²⁴

In folgenden Faktoren unterscheiden sich die verschiedenen Definitionen der ZEB:

Systemgrenze

Die Systemgrenze kann ein einzelnes Gebäude oder beispielsweise eine Siedlung umfassen. Dadurch wird bestimmt welche Anlagen zur regenerativen Stromerzeugung mit in die Bilanz einbezogen werden.²⁵

Bilanzgrenze/Bilanzraum

Die Bilanzgrenze definiert welche Energieaufwendungen in der Bilanz berücksichtigt werden. Es kann der gebäudetechnische Energiebedarf, also der Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser sowie der Hilfsenergiebedarf für Heizung, Warmwasser und Lüftungsanlage, bilanziert werden. Des Weiteren kann die Beleuchtung und der

²² Vgl. Voss et al. (2012).

²³ Vgl. Voss et al. (2012).

²⁴ Abbildung entnommen aus Voss et al. (2012).

²⁵ Vgl. Sartori et al. (2012).

Haushaltsstrom in die Bilanzierung einbezogen werden. Es existieren außerdem Modelle, die die Elektromobilität in den Bilanzraum einbeziehen.

In Bezug auf die Stromerzeugung können nur erneuerbare Energien, KWK-Anlagen oder eine Kombination aus beidem berücksichtigt werden.²⁶

Zeitraum der Bilanzierung

Der Bilanzierungszeitraum beschreibt über welche Zeitspanne die Bilanz ausgeglichen sein sollte. In den meisten Fällen wird dabei ein Jahr angenommen.²⁷ Außerdem kann eine saisonale oder monatliche Bilanz verwendet werden. In einigen Fällen wird aber auch versucht über die Lebensdauer des Gebäudes zu bilanzieren.

Bilanzsystem

Das Bilanzsystem beschreibt die Einheit, in der die Bilanz durchgeführt wird. Verwendet wird zum Beispiel Primärenergie, CO₂ Äquivalente, bezogene Energie oder Energiekosten.²⁸

Art der Bilanzierung

Es kann eine Import/Export-Bilanz durchgeführt werden, bei der der Strombezug aus dem Netz mit dem in das Netz eingespeisten Strom verglichen wird²⁹. Außerdem existiert eine Bedarf/Erzeugung-Bilanz, bei der der Strombedarf eines Jahres mit der Stromerzeugung verrechnet wird. Der Austausch mit dem Stromnetz wird also nicht berücksichtigt.³⁰ Um zu ermitteln welcher Anteil des Strombedarfs durch die Stromerzeugung gedeckt werden kann, werden kleinere Zeitschrittweiten betrachtet, die zeitabhängige Bedarfs- und Erzeugungsprofile berücksichtigen. Es existieren beispielsweise monatliche Bilanzierungen, wie die EnEV.

Anhand der eben aufgeführten Menge an unterschiedlichen Definitionen wird deutlich, dass der Bedarf nach einem einheitlich definierten Standard existiert.

Die EU Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) definiert sogenannte „nearly Zero-Energy Buildings“ (nZEB) also Niedrigstenergiegebäude, welche einen sehr geringen oder fast bei null liegenden Energiebedarf aufweisen und diesen zu einem wesentlichen Teil aus selbst erzeugter Energie aus erneuerbaren Quellen decken.³¹

Deutschland hat sich dazu verpflichtet das in der Festlegung der EPBD festgesetzte Ziel, dass ab 2020 alle neu errichteten Wohngebäude in der Europäischen Union Niedrigstenergiegebäude sein müssen³², umzusetzen.

²⁶ Vgl. Marszal et al. (2011).

²⁷ Vgl. Sartori et al. (2012).

²⁸ Vgl. Marszal et al. (2011).

²⁹ Vgl. Voss et al. (2012).

³⁰ Vgl. Voss et al. (2012).

³¹ Vgl. EPBD (2010), Artikel 2.

³² Vgl. EPBD (2010), Artikel 9.

Da die Definitionen von nZEB variieren, wäre es sinnvoll, eine einheitliche Definition zu finden.³³ Das CEN-Mandat hat einen Normentwurf prEN 15603 entwickelt, welcher „transparente und eindeutige Berechnungsverfahren [...]“³⁴ zur Unterstützung der Mitgliedsstaaten bei der Umsetzung der EPBD enthält. Die Mitgliedsstaaten sollen auf Grundlagen dieser Richtlinien ihren Prioritäten entsprechende eigene nationale Anforderungen aufsetzen.³⁵

³³ Vgl. Zirngibl (2014).

³⁴ Zirngibl (2014).

³⁵ Vgl. Zirngibl (2014).

3 Beschreibung der Methodik

Ziel dieses Kapitels ist es, das methodische Vorgehen bei der Bestimmung des Eigenbedarfsdeckungsanteils des Strombedarfs von Wohnhäusern, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wird, zu erläutern.

Bei der energetischen Bewertung von Wohnhäusern geht es darum, den Primär-, End- und Nutzenergiebedarf und den spezifischen Transmissionswärmeverlust dieser zu ermitteln. Gesetzliche Grundlage in Deutschland stellt dafür die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014 dar. Um zu ermitteln, welcher Anteil des Endenergiebedarfs durch direkt am Gebäude produzierten Strom gedeckt werden kann, ist gemäß EnEV bzw. DIN V 18599 eine monatliche Verrechnung des Strombedarfs mit der Stromproduktion durchzuführen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst nach EnEV eine solche Verrechnung des Strombedarfs mit dem am Wohngebäude erzeugten Strom durchgeführt. Die Monatswerte für Stromproduktion und Strombedarf, ermittelt nach EnEV, stellen dabei die Ausgangslage für eine eigene Untersuchung des Eigenbedarfsdeckungsanteils dar. Durch eigens entwickelte Konzepte wird die Verrechnungsschrittweite bis auf die Stundenebene verringert. Außerdem soll im Rahmen der Analyse der Verrechnungsraum variiert werden. Neben der EnEV-Methode, bei welcher sich dieser auf den Strombedarf für die Anlagentechnik beschränkt, soll wahlweise auch der Haushaltsstrom in die Berechnung mit einbezogen werden können. Am Ende des Kapitels wird beschrieben, wie mittels Tabellenwerten eine schnelle Einschätzung der möglichen Eigenbedarfsdeckung von Wohngebäuden durchgeführt werden kann.

Im Folgenden werden zuerst die Grundlagen und Begrifflichkeiten der Methodik geklärt. Anschließend wird das Konzept der Umsetzung eines selbst entwickelten Eigenbedarfsdeckungstools (EBD-Tool) erläutert.

3.1 Ermittlung des Eigenbedarfsdeckungsanteils

Der Eigenbedarfsdeckungsanteil beschreibt, wie viel des Strombedarfs von Wohnhäusern durch direkt im oder am Gebäude erzeugte Energie gedeckt werden kann.

Abhängig ist der Eigenbedarfsdeckungsanteil von folgenden Bestandteilen:

- Strombedarf
- Stromproduktion
- Verrechnungsraum
- Verrechnungsschrittweite

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Komponenten eingegangen und es werden die grundlegenden Begrifflichkeiten bei der Bestimmung des Eigenbedarfsdeckungsanteils geklärt. Außerdem wird ein weiterer Kennwert, das Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf, eingeführt. Die folgenden in diesem Kapitel verwendeten Formeln wurden aus einem aktuellen Entwurf zu den Berechnungen im TABULA-Verfahren (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment) entnommen.³⁶ Die Formeln sind konsistent mit dem EU Normenentwurf prEN 15603:2013 (E), Abschnitt 11.3³⁷.

3.1.1 Grundsätze

Stromproduktion und Strombedarf

Die Stromproduktion während eines bestimmten Zeitraums i trägt zur Deckung des in diesem Zeitraum vorhandenen Strombedarfs bei. Es werden dabei zwei verschiedene Fälle unterschieden

1. Stromproduktion in $i <$ Strombedarf in i
2. Stromproduktion in $i \geq$ Strombedarf in i

Der erste Fall bedeutet, dass im Zeitraum i die Stromproduktion nicht ausreicht um den Strombedarf zu decken. In diesem Fall bezieht das Gebäude dann zusätzlich Strom aus dem Netz. Im zweiten Fall kann der Strombedarf für den Zeitraum i vollständig gedeckt werden. Der eventuell überschüssige Strom wird dabei ins Netz eingespeist, also nicht genutzt und trägt demnach auch nicht zur Eigendeckung bei. Es wird in diesem Fall also kein weiterer Strom aus dem Netz benötigt.

Die Stromproduktion wird demnach unterschieden in:

- Gesamte Stromproduktion im Zeitraum i
- Stromproduktion, die im Zeitraum i für die Eigendeckung genutzt werden kann

Der vom Netz bezogene Strom stellt den nach Verrechnung der Stromproduktion mit dem Bedarf noch benötigten Reststrombedarf dar.

$$E_{del,i} = \max(E_{dem,i} - E_{prod,i}, 0) \quad [\text{kWh}] \quad (1)$$

mit

$$E_{del,i} \quad \text{Vom Netz bereitgestellter Strom im Zeitraum } i \quad [\text{kWh}]$$

³⁶ Loga et al. (2014).

³⁷ Vgl. prEN 15603 (2013).

$E_{dem,i}$	Strombedarf im Zeitraum i	[kWh]
$E_{prod,i}$	Stromproduktion im Zeitraum i	[kWh]

Beziehungsweise:

$$E_{del,i} = E_{dem,i} - E_{prod,i,usable} \quad [\text{kWh}] \quad (2)$$

mit

$E_{prod,i,usable}$ Stromproduktion, die im Zeitraum i zur Eigendeckung genutzt werden kann [kWh]

Eigenbedarfsdeckungsanteil

Der Eigenbedarfsdeckungsanteil wird bezogen auf ein ganzes Jahr ermittelt.

Der vom Netz gelieferte Strom pro Jahr ergibt sich aus der entsprechenden Summe der Zeiträume i .

$$E_{del,a} = \sum_i E_{del,i} \quad [\text{kWh}] \quad (3)$$

Oder anders ausgedrückt, ist er der gesamte elektrische Endenergiebedarf eines Jahres abzüglich des Anteils des jährlich produzierten Stroms, welcher tatsächlich genutzt werden kann.

$$E_{del,a} = E_{dem,a} - E_{prod,a,usable} \quad [\text{kWh/a}] \quad (4)$$

Der Eigenbedarfsdeckungsanteil ist also der Anteil der selbst genutzten Stromproduktion am Strombedarf.

$$\alpha_{el,prod} = \frac{E_{prod,a,usable}}{E_{dem,a}} \quad [-] \quad (5)$$

mit

$$\alpha_{el,prod} \in [0,1]$$

Verhältnis Stromproduktion zu -bedarf

Wie bereits erklärt, wird der Anteil der Stromproduktion, der nicht zur zeitgleichen Bedarfsdeckung verwendet werden kann, in das Netz eingespeist. Mittels eines Faktors kann abgebildet werden, wie viel Strom im Verhältnis zum Strombedarf insgesamt produziert wird. Das sogenannte Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf wird für die Ergebnisdarstellung benötigt. Um verschiedene Eigenbedarfsdeckungsanteile vergleichen und bewerten zu können, werden diese als Funktion des Verhältnisses der Stromproduktion zu Strombedarf abgebildet.

$$\gamma_{el} = \frac{E_{prod}}{E_{dem}} \quad [-] \quad (6)$$

mit

$$\gamma_{el} \quad \text{Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf} \quad [-] \quad (7)$$

3.1.2 Verrechnungsraum

Der Verrechnungsraum legt fest, welche Anteile des Strombedarfs von Wohnhäusern in die Verrechnung mit der Stromproduktion einbezogen werden. Primär wird dabei unterschieden zwischen:

- Strombedarf für Anlagentechnik
- Strombedarf für Anlagentechnik und Haushaltsstrom

Der Strombedarf für die Anlagentechnik muss für die weitere Betrachtung aber noch genauer unterteilt werden. Dieser ist abhängig davon, welche Anlagen verwendet werden und welche Anteile des Energiebedarfs der Anlagen mit Strom gedeckt werden. Somit ergeben sich verschiedene Fälle, welche nach Tabelle 1 unterschieden werden:

Verrechnungsraum	
Abkürzung	Beschreibung
Hilfs(H+WW)	Hilfsenergie Heizung, Warmwasser
Hilfs(H+WW+WLA)	Hilfsenergie Heizung, Warmwasser, Lüftung
H+WW + Hilfs(H+WW)	Strom für Wärmeerzeugung Heizung, Warmwasser + Hilfsenergie Heizung, Warmwasser
H+WW + Hilfs(H+WW+WLA)	Strom für Wärmeerzeugung Heizung, Warmwasser + Hilfsenergie Heizung, Warmwasser, Lüftung
... + HStrom	alle Kombinationen mit Haushaltsstrom

Tabelle 1: Verrechnungsräume³⁸

³⁸ Tabelle selbst erstellt (29.07.14).

- Fall <Hilfs(H+WW)>

Hilfsenergie für Heizung (H) und Warmwasser (WW) (wie es zum Beispiel für einen Brennwertkessel der Fall wäre)

$$E_{dem,i} = E_{aux,h,i} + E_{aux,w,i} \quad [\text{kWh}] \quad (8)$$

- Fall <Hilfs(H+WW+WLA)>

Hilfsenergie für Heizung, Warmwasser und Wohnungslüftungsanlage (WLA)

$$E_{dem,i} = E_{aux,h,i} + E_{aux,w,i} + E_{aux,vent,i} \quad [\text{kWh}] \quad (9)$$

- Fall <H+WW + Hilfs(H+WW)>

Strom für Wärmeerzeugung Heizung und Warmwasser (bei beispielsweise einer Wärmepumpe), Hilfsenergie für Heizung und Warmwasser

$$E_{dem,i} = E_{h,dem} + E_{w,dem} + E_{aux,h,i} + E_{aux,w,i} \quad [\text{kWh}] \quad (10)$$

- Fall <H+WW + Hilfs(H+WW+WLA)>

Strom für Wärmeerzeugung Heizung und Warmwasser, Hilfsenergie für Heizung, Warmwasser und Wohnungslüftungsanlage

$$E_{dem,i} = E_{h,dem,i} + E_{w,dem,i} + E_{aux,h,i} + E_{aux,w,i} + E_{aux,vent,i} \quad [\text{kWh}] \quad (11)$$

- Fall <... + HStrom>

Alle eben genannten Fälle in Kombination mit Berücksichtigung des Haushaltsstroms

$$E_{dem,i} = \dots + E_{HE,dem,i} \quad [\text{kWh}] \quad (12)$$

mit

$E_{aux,h,i}$ $E_{aux,w,i}$ Hilfsenergiebedarf für Heizung und Warmwasser im Zeitraum i [kWh]

$E_{aux,vent,i}$ Hilfsenergiebedarf für Wohnungslüftungsanlage im Zeitschritt i [kWh]

$E_{h,dem,i}$	$E_{w,dem,i}$	Strombedarf des Wärmeerzeugers für Heizung und Warmwasser im Zeitraum i	[kWh]
$E_{HE,dem,i}$		Strombedarf für Haushaltsstrom im Zeitraum i	[kWh]

3.1.3 Verrechnungsschrittweite

Die Verrechnungsschrittweite ist in Bezug auf die in 3.1.1 und 3.1.2 erklärten Formeln Nr. 1-12, der zugrunde gelegte Zeitraum i . Sie bestimmt also, über welchen Zeitraum eine Verrechnung des Strombedarfs mit der Stromproduktion vorgenommen wird. Eine hohe Abhängigkeit der Eigenbedarfsdeckung von der Verrechnungsschrittweite ist zu erwarten.

Nach EnEV 2014 und DIN V 18599 wird eine monatliche Bilanzierung durchgeführt. saisonale und tageszeitabhängige Unterschiede der regenerativen Stromerzeugung, sowie des Strombedarfs werden jedoch je nach betrachteter Schrittweite mehr oder weniger berücksichtigt. Darum wird die monatliche Bilanzierung der DIN V 18599 im Rahmen dieser Arbeit erweitert, sodass die Verrechnungsschrittweiten aus Tabelle 2 Beachtung finden:

Verrechnungsschrittweite	
Code	Beschreibung
B1	Jahr
B2	Monat
B3	Tag
B4	Stunde

Tabelle 2: Verrechnungsschrittweite³⁹

In dieser Arbeit wird also die monatliche Verrechnung bis auf die Stundenebene ausgebaut. Trotz verschiedener Verrechnungsschrittweiten wird der Eigenbedarfsdeckungsanteil immer auf ein Jahr bezogen. Untersuchungsziel ist es herauszufinden, inwieweit der erreichte Eigenbedarfsdeckungsanteil von der Verrechnungsschrittweite abhängt.

³⁹ Tabelle selbst erstellt (29.07.14).

3.2 Eigene Umsetzung

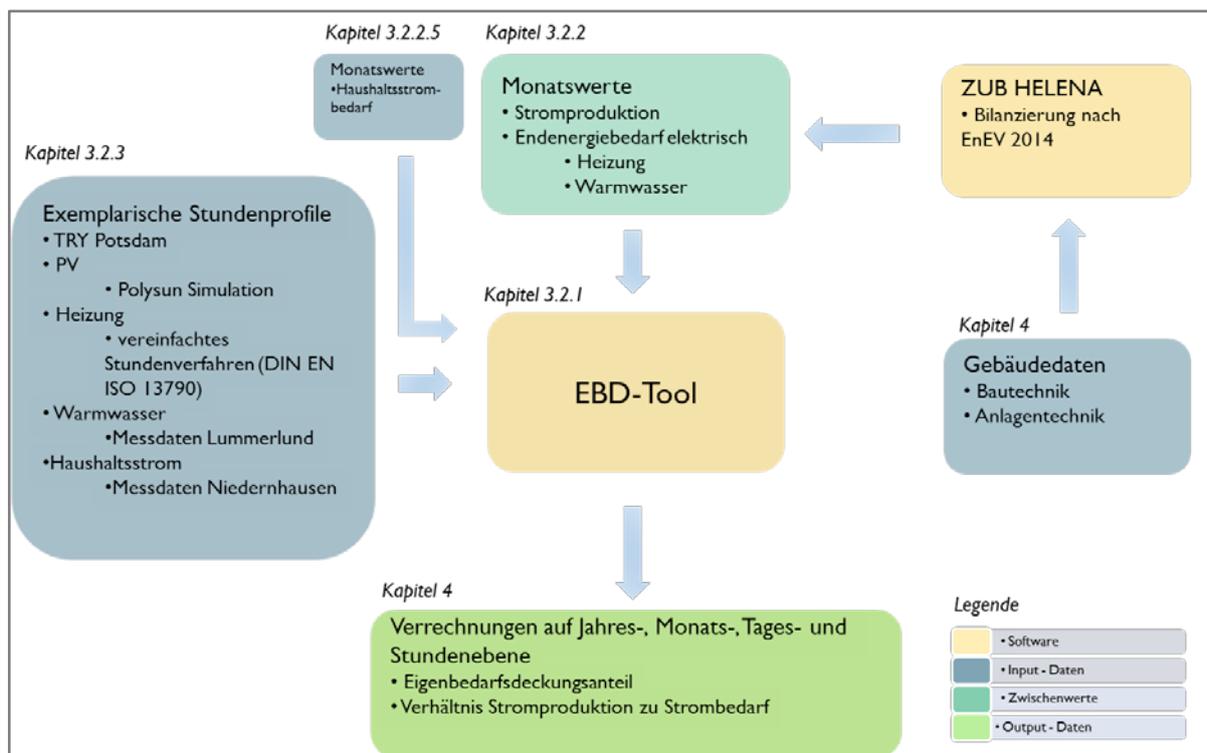


Abbildung 2: Umsetzung der Aufgabenstellung⁴⁰

Im Mittelpunkt stehen zwei Verfahren, ZUB Helena zur Erzeugung der Monatswerte gemäß EnEV 2014 und das im Rahmen der Bachelorthesis auf Basis von MS Excel erstellte Eigenbedarfsdeckungstool (EBD-Tool). Beide sind in Abbildung 2 als Software gekennzeichnet. Die Inputdaten für ZUB Helena sind die Gebäudedaten. Der Output von ZUB Helena wird als Zwischenwerte in das EBD-Tool eingespeist, das die Ergebnisse der Verrechnung auf Jahres-, Monats-, Tages und Stundenebene berechnet. Für die Erzeugung der Verrechnungsprofile verarbeitet das EBD Tool zusätzlich noch Angaben zum Haushaltsstrombedarf und nutzt exemplarische Stundenprofile.

Im Folgenden wird der methodische Ablauf der Analyse der Reihenfolge nach erläutert.

In der EnEV Bilanzierungssoftware ZUB Helena werden die Gebäudeparameter und die Anlagentechnik für das betrachtete Wohngebäude hinterlegt. Nach Vorgabe durch EnEV 2014 und DIN V 18599 erstellt das Programm eine vollständige Monatsbilanz. Die monatlichen Werte des elektrischen Endenergiebedarfs der Anlagentechnik, sowie der regenerativen Stromproduktion können dem Programm auch einzeln entnommen werden.

⁴⁰ Abbildung selbst erstellt (11.06.14).

Im Anschluss daran beginnt die eigene Analyse. Mit den gewonnenen Werten als Eingabedaten, kann die monatliche Verrechnung von Strombedarf und -produktion für den Verrechnungsraum „Strom für Anlagentechnik“ im EBD-Tool bereits vollständig fertig gestellt werden. Es sollten dabei die gleichen Ergebnisse wie bei der EnEV-Bilanzierung der ZUB-Helena-Software herauskommen. Die jährliche Verrechnung, welche durch Aufsummierung der Monatsdaten und anschließender Verrechnung berechnet wird, ist im Zuge dessen ebenso komplett. Für den erweiterten Bilanzraum „Anlagentechnik + Haushaltsstrom“ kommt zusätzlich zu den Daten der EnEV-Software noch ein monatliches Profil für den Haushaltsstrombedarf hinzu.

Da aber auch eine Verrechnung auf Tages- und Stundenebene durchgeführt werden soll, sind noch weitere Berechnungsschritte anzuschließen. Zum einen müssen die Monatsdaten der EnEV-Software noch aufbereitet und nach den benötigten Bestandteilen getrennt werden. Es werden von der ZUB-Helena-Software nicht alle hier interessierenden Energieströme in Monatswerten ausgegeben. Zum anderen werden weitere Daten als Input für das EBD-Tool benötigt. Es handelt sich dabei um synthetisch erzeugte stundengenaue Profile, welche sich bei Normierung auf die Monatswerte in stundengenaue Bedarfs- und Produktionswerte überführen lassen. Basis für die erzeugten exemplarischen Stundenprofile sind, wie in Kapitel 3.2.3 noch genauer beschrieben wird, Temperaturdaten aus dem Testreferenzjahr Potsdam, ein PV-Simulationsprogramm, ein vereinfachtes Stundenverfahren zur Berechnung des Heizwärmebedarfs und verschiedene Messdaten. Das Bilanzierungstool leitet aus den berechneten Stundenwerten durch Summation die Tageswerte ab. Als Ergebnis liefert das EBD-Tool die erreichbaren Eigenbedarfsdeckungsanteile des Strombedarfs zu gegebenen Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf.

3.2.1 Eigenbedarfsdeckungstool (EBD-Tool)

Die wichtigsten Bestandteile des EBD-Tools werden im Folgenden kurz erläutert. Außerdem soll verdeutlicht werden, welche Daten eins zu eins aus der EnEV-Software kopiert werden können und welche im Rahmen der eigenen Analyse erzeugt werden.

- Tabellenblatt „monatlich“

Ausgang für die Berechnungen im EBD-Tool sind die Monatsergebnisse aus ZUB Helena, die im Datenblatt „monatlich“ eingetragen werden. In Tabelle 3 ist anhand der gelb markierten Felder genau zu erkennen, welche Monatswerte direkt aus der EnEV-Software übernommen werden. Die braunen Felder sind, wie die gelben, ebenfalls Inputdaten, deren Datenquelle aber nicht die Ergebnisse der EnEV-Bilanzierung sind. In blau markiert sind die Monatswerte, welche berechnet werden. Die Erzeugungen der Monatswerte für die gelben, braunen und blauen Felder werden in Kapitel 3.2.2 erklärt.

3 Beschreibung der Methodik

Monat	Stromproduktion [kWh]			Endenergiebedarf elektrisch [kWh]								
	PV	KWK	Gesamt	Haushaltsstrom	Gesamt WW	Gesamt H	Hilfsenergie WW	Hilfsenergie H	Hilfsenergie WLA	Bedarfsstrom WW	Bedarfsstrom H	Gesamt
1	23,6	0	23,6	0,0	127,4	323,90	25,03	94,71	65,55	102,37	163,64	451,30
2	24,1	0	24,1	0,0	114,7	281,50	22,53	81,49	59,21	92,17	140,80	396,20
3	58,5	0	58,5	0,0	125,5	139,90	24,66	27,26	65,55	100,84	47,09	265,40
4	106,3	0	106,3	0,0	119,2	63,40	23,42	0,00	63,43	95,78	0,00	182,60
5	116,5	0	116,5	0,0	120,9	65,50	23,75	0,00	65,55	97,15	0,00	186,40
6	120,2	0	120,2	0,0	115,7	63,40	22,73	0,00	63,43	92,97	0,00	179,10
7	108,8	0	108,8	0,0	118,4	65,50	23,26	0,00	65,55	95,14	0,00	183,90
8	99,6	0	99,6	0,0	118,7	65,50	23,32	0,00	65,55	95,38	0,00	184,20
9	73,0	0	73,0	0,0	116,9	63,40	22,97	0,00	63,43	93,93	0,00	180,30
10	52,4	0	52,4	0,0	123,1	79,50	24,18	5,11	65,55	98,92	8,84	202,60
11	18,9	0	18,9	0,0	121,8	267,80	23,93	74,92	63,43	97,87	129,45	389,60
12	11,8	0	11,8	0,0	127,6	393,60	25,07	120,26	65,55	102,53	207,79	521,20
Gesamt	813,8	0	813,8	0,0	1.449,9	1.872,90	284,85	403,66	771,79	1.165,05	697,45	3.322,80

Tabelle 3: Tabellenblatt "monatlich"⁴¹

- Tabellenblatt „jährlich“:

Bei dem Tabellenblatt „jährlich“ handelt es sich um eine Vereinfachung der monatlichen Verrechnung. Es werden also keine Werte eingetragen, die Ergebnisse werden selbstständig aus den Werten des Datenblattes „monatlich“ berechnet.

- Tabellenblatt „stündlich“:

Die Verrechnung der stündlichen Werte erfolgt nach dem gleichen Aufbau, wie auch schon die Monats- und Jahresbilanz. Da die stündlichen Werte allerdings, wie in Kapitel 3.2.3 genauer beschrieben, erst noch erzeugt werden müssen, greift dieses Tabellenblatt auf einige Hilfstabellen zu, um die Daten zu generieren. Bezugsgrößen bleiben gleichwohl die Monatswerte aus ZUB Helena.

- Tabellenblatt „täglich“:

Auf Tagesebene stellt die Verrechnung, vergleichbar mit dem Tabellenblatt „jährlich“, eine Zusammenfassung der Stundenwerte dar.

- Hilfstabellen:

- PV
- KWK
- WW
- H
- HStrom

Alle Eingabegrößen treten ausschließlich in der Monatstabelle und in den Hilfstabellen auf.

⁴¹ Abbildung selbst erstellt (25.07.14).

3.2.2 Konzepte zur Datenbeschaffung der Monatswerte

3.2.2.1 Photovoltaik

Die monatliche Stromproduktion der Photovoltaikanlage (PV) kann der EnEV-Software direkt entnommen werden. Im Folgenden wird erklärt, wie die Monatswerte in der EnEV-Software berechnet werden.

Laut EnEV 2014 sind „Bei Anlagen zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie [...] die monatlichen Stromerträge unter Verwendung der mittleren monatlichen Strahlungsintensitäten der Referenzklimazone Potsdam nach DIN V 18599-10: 2011-12 Anhang E sowie der Standardwerte zur Ermittlung der Nennleistung des Photovoltaikmoduls nach DIN V 18599-9: 2011-12 Anhang B zu ermitteln.“⁴². Das Testreferenzjahr (TRY) der Klimazone Potsdam, welches 2010 erneuert wurde, bietet „speziell zusammengestellte Datensätze, die für jede Stunde eines Jahres verschiedene meteorologische Daten enthalten. Sie sollen einen mittleren, aber für das Jahr und eine bestimmte Region typischen Witterungsverlauf repräsentieren.“⁴³

Die meteorologischen Daten des TRY beinhalten unter anderem die stündlichen Werte für:

- Außentemperatur
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit
- Luftfeuchtigkeit

Die Globalstrahlung bezogen auf die Ausrichtung und Neigung des PV-Moduls ist Voraussetzung für die Berechnung nach DIN V 18599-10.

Außerdem werden um den Ertrag zu berechnen noch weitere Werte benötigt, welche als Inputdaten in die EnEV-Software eingegeben werden müssen:

- Systemleistungsfaktor der Module
- Leistung der Module in kW_p
- Orientierung nach Himmelsrichtung
- Neigung in Grad

Der Systemleistungsfaktor und die Leistung werden anhand der Tabelle für Standardwerte von PV-Systemen in Anhang B der DIN V 18599 (Abbildung 3) bestimmt. Als Zelltyp wird monokristallines Silizium mit einem Wert von $0,135 \text{ kW}_p/\text{m}^2$ angenommen. Die Größe der Anlage wird über die verfügbare Dachfläche mit Abzug eines Seitenabstandes von 0,5 m zu Rändern und Fenstern festgelegt. Die Orientierung und die Neigung werden nach realen Begebenheiten eingestellt. Zu beachten

⁴² EnEV 2014, §5 Nr. 2.

⁴³ <http://www.dwd.de/TRY> (Zugriff am 07.08.14).

ist, dass pro Gebäude nur eine Einstellung für die PV eingegeben werden kann. Für die Platzierung der Anlage auf verschiedenen Dachseiten muss also eine gemittelte Einstellung gefunden werden.

DIN V 18599-9:2011-12

— Vornorm —

Anhang B
(normativ)

Standardwerte Photovoltaik-Systeme

Tabelle B.1 — Standardwerte für den Systemleistungsfaktor

Technologie	f_{perf}		
	kristallin, CIS, CdTe	Amorph (triple), HIT	Organisch
Unbelüftete Module (direkt auf Dämmung bzw. Unterkonstruktion)	0,7	0,75	0,9
Mäßig belüftete Module	0,75	0,77	0,89
Stark belüftete oder freistehende Module	0,8	0,8	0,88

Tabelle B.2 — Standardwerte für den Peakleistungskoeffizienten

Zelltyp	Zellwirkungsgrad η_{Zelle} %	K_{pk} kW _p /m ²
Monokristallines Silizium	16	0,135
Polykristallines Silizium	15	0,125
Amorphes Silizium in Single-Junction-Technik	6	0,0555
Amorphes Silizium in Mehrfach-Junction-Technik / mikro-amorph	7	0,065
Kupfer-Indium/Gallium-diselenid CIS/CIGS	11	0,090
Cadmium-Tellurid CdTe	10	0,090
Organisch	3	0,025
Dabei ist η_{Zelle} der Zellwirkungsgrad nach DIN EN 60904-1 (VDE 0126-4-1)		
ANMERKUNG 1 Mit einer Mindestpackungsdichte von 0,9.		
ANMERKUNG 2 Packungsdichte ist das Verhältnis zwischen der Oberfläche von den PV-Zellen und der Gesamtoberfläche des Laminats, in dem die Zellen eingebettet sind (exklusive der Randeinbindung).		

Abbildung 3: Standardwerte PV-Systeme⁴⁴

⁴⁴ Abbildung entnommen aus DIN V 18599-9:2011-12.

3.2.2.2 Kraft-Wärme-Kopplung

Die monatliche Stromerzeugung eines wärmegeführten BHKW wird von der EnEV-Software nicht separat aufgeführt sondern mittels einer Reduktion des Primärenergiefaktors der Wärme abgebildet. Aufgrund der Berechnungen der EnEV-Software ist die eigentliche Stromproduktion nicht mehr nachvollziehbar. Nach DIN V 18599-9⁴⁵ können zwei verschiedene Methoden der Berücksichtigung der KWK bei wärmegeführter Betriebsweise verwendet werden. Zum einen, ein Verfahren nach der eben beschriebenen Bilanzgrenze „Primärenergiefaktor“ und zum anderen eines nach der Bilanzgrenze „Wärmeerzeugungsanlage“. Bei Berechnung nach der zweiten Methode „ergibt sich der Endenergiebedarf für die zuzuführenden Brennstoffe der KWK-Anlage und des zweiten Wärmeerzeugers $\Sigma Q_{f,i}$ sowie die erzeugte Strommenge $Q_{f,prod,CHP,a}$ “⁴⁶. Dieser Berechnungsansatz wäre für die Analyse zielführend, ist aber in der Software ZUB Helena nicht umsetzbar. Die Ermittlung der monatlichen Stromproduktion bei einem wärmegeführten Micro-BHKW ist also nur über einen Umweg möglich. In ZUB Helena sind die Eingabeparameter der KWK der Deckungsanteil, die Stromkennzahl und der Nutzungsgrad der Anlage. Der Deckungsanteil wird, wie in Abbildung 4 zu sehen, auf den gewünschten Anteil eingestellt. Um nun die Stromproduktion des BHKWs ermitteln zu können wird die Stromkennzahl jedoch auf Null gesetzt und als Nutzungsgrad wird nur der thermische Nutzungsgrad eingegeben.

Parameter	Wert	Standardwert
Berücksichtigung der Stromproduktion	Bilanzierung Primärenergiefaktor der Wärme	
Primärenergiefaktor [-]	0,41	
Deckungsanteil κ [-]	0,600	
Stromkennzahl σ [-]	0,000	
Nutzungsgrad KWK-Anlage η_{CHP} [-]	0,740	
Netznutzungsgrad η_{HH} [-]	1,000	<input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 4: Modifikation der ZUB-HELENA-Einstellungen zur Ermittlung der Monatswerte des Endenergiebedarfs einer KWK-Anlage: Ausschalten der Stromerzeugung für die Zwischenberechnung⁴⁷

⁴⁵ Vgl. DIN V 18599-9 (2011-12), Kapitel 5.1.

⁴⁶ DIN V 18599-9 (2011-12), S.16.

⁴⁷ Abbildung entnommen aus ZUB Helena (04.08.14).

Aus den sich daraus ergebenden Werten für den Endenergiebedarf (in ZUB Helena „Endenergie Nah Fernwärme – KWK“) kann dann mit Multiplikation des elektrischen Wirkungsgrads der Anlage die monatliche Stromproduktion ausgerechnet werden:

$$\text{Endenergie}_{KWK} \times \eta_{el} = \text{Strom}_{KWK} [kWh]$$

Für den thermischen und den elektrischen Wirkungsgrad werden für die Analysen im Rahmen dieser Arbeit die technischen Daten eines „Dachs“-BHKW zugrunde gelegt.

3.2.2.3 Heizung

Bei der Ermittlung der einzelnen Bestandteile der gesamten elektrischen Endenergie der Heizung (Gesamt H) wird, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, nach verschiedenen Fällen unterschieden. Da die Monatswerte zu Gesamt H aus der EnEV-Software nicht nach Bestandteilen getrennt verfügbar sind, müssen diese nach folgenden Konzepten ermittelt werden:

- Fall <Hilfs (H)>

Gesamt H besteht in diesem Fall nur aus Hilfsstrom zum Heizen, die Monatsverteilung ist also gegeben.

- Fall <Hilfs(H + WLA)>

Gesamt H besteht in diesem Fall aus Hilfsstrom zum Heizen und für die Wohnungslüftungsanlage (WLA). Die jeweiligen Jahreswerte sind gegeben. Da außerdem bekannt ist, dass sich der Jahreswert des Hilfsstroms für WLA nach der Anzahl an Tagen eines Monats aufteilt, kann die monatliche Verteilung mittels folgender Formel ermittelt werden:

$$WLA_{\text{Monat},m} = WLA_{\text{Jahr}} \frac{\text{Tage}_{\text{Monat},m}}{365} [kWh]$$

Die Monatswerte für Hilfsstrom H sind dann nach Abzug der WLA Werte auch vorhanden.

- Fall <H + Hilfs(H)>

Gesamt H besteht in diesem Fall aus dem Strom für Hilfsenergie H und für Wärmeerzeugung H. Der Jahreswert für Hilfsstrom H ist vorhanden und damit auch der für Bedarfs H. Die Monatswerte für Gesamt H werden nach der prozentualen Verteilung der Jahreswerte bestimmt.

- Fall <H + Hilfs(H + WLA)>

Wie in Fall <H + Hilfs(H)> werden zuerst die Monatswerte der WLA berechnet. Der verbleibende Rest des Bedarfs für Gesamt H wird analog zu Fall <H + Hilfs(H)> aufgeteilt.

Der Verrechnungsraum „Anlagentechnik + Haushaltsstrom“ wird in 3.2.2.5 behandelt.

Kleine Divergenzen können bei eben beschriebener Berechnung der Fälle $\langle H + \text{Hilfs}(H) \rangle$ und $\langle H + \text{Hilfs}(H + \text{WLA}) \rangle$ in den Sommermonaten auftreten, wenn sich der Strombedarf nur aus dem der WLA zusammensetzt. Die aus ZUB Helena gewonnenen Ergebnisse sind gerundete Werte. Das heißt, die berechneten Werte der Lüftungsanlage weichen ab der zweiten Dezimalstelle von den ausgegebenen Werten ab. In den Sommermonaten besteht dadurch die Gefahr, dass ein negativer Rest auf den Strom für Wärmeerzeugung H und Hilfsstrom H übertragen wird. In diesen Fällen wird der Anteil dieser beiden Bedarfe auf Null gesetzt, was zur Folge hat, dass die Jahressummen nicht identisch mit denen aus ZUB Helena sind. Da die Abweichungen dieser aber im zehntausendstel Bereich liegen, ist diese Tatsache für die weiteren Berechnungen von keiner Bedeutung, sondern wurde lediglich erwähnt um Missverständnissen vorzubeugen.

3.2.2.4 Warmwasser

Analog zu Kapitel 3.2.2.3 wird für die monatliche Aufteilung des Gesamt WW-Bedarfs auf die verschiedenen Fälle zurückgegriffen. Hier müssen allerdings lediglich zwei Fälle unterschieden werden, da der Hilfsstrom WLA dem Gesamt H Bedarf zugerechnet wird. Die beiden Fälle $\langle \text{Hilfs}(H + \text{WW}) \rangle$ und $\langle H + \text{WW} + \text{Hilfs}(H + \text{WW}) \rangle$ werden nach dem gleichen Verfahren dieser Fälle in 3.2.2.3 berechnet.

3.2.2.5 Haushaltsstrom

Da der Haushaltsstrom nach dem Ansatz der DIN V 18599 nicht mit in die EnEV-Bilanzierung einbezogen wird, sind die Monatswerte für diesen auf anderem Wege zu beschaffen.

Der Effizienzhaus-Plus-Standard nach der Bekanntmachung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung berücksichtigt die Endenergie für Wohnungsbeleuchtung und Haushaltsgeräte und -Prozesse. Der Effizienzhaus-Plus-Standard wird im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit betrachtet, es wird lediglich der Ansatz für den Haushaltsstrom übernommen. Durch die Verwendung dieser Werte entsprechen die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse bei Verrechnung auf Jahresebene den Nachweisgrößen des Effizienzhaus-Plus-Standards. Für den Haushaltsstrom ist „[...] ein pauschaler Wert von 20 kWh/m²a (davon Kochen: 3 kWh/m²a) jedoch maximal 2.500 kWh/a je Wohneinheit anzunehmen.“⁴⁸ Zu beachten ist, dass der Ansatz auf der Nutzung von energieeffizienten Haushaltsgeräten basiert.

⁴⁸ http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/Bauen/anlage-1-definition_und_berechnungsgrundlage.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 30.07.14).

3.2.3 Konzepte zur exemplarischen Erzeugung von Stundenwerten

Im Folgenden werden die eigens entwickelten Konzepte zur Ermittlung von exemplarischen Stundendaten erläutert. Bei den hier verwendeten Methoden handelt es sich um Simulationen, die sich zum Teil auf Messwerte stützen, jedoch synthetisch erzeugte Daten liefern.

3.2.3.1 Photovoltaik

PV-Simulation mit Polysun

Die Globalstrahlung der stündlichen Werte des TRY ist, im Gegensatz zu den Monatswerten, nur auf die horizontale Ebene angegeben. Aus diesem Grund wird zur Ermittlung der Stromproduktion nicht der Rechenweg der DIN V 18599 verwendet, sondern ein Simulationsprogramm eingesetzt, das auf Basis der Daten des TRY Potsdam die Stromproduktion der PV-Anlage simuliert.

Durchgeführt wird die PV-Simulation mit dem Programm „Polysun“, einer Software zur Ermittlung des Ertrags von PV-Anlagen.

Eingabedaten für die PV-Simulation sind Parameter wie z. B.:

- die Leistung
- die Neigung
- die Orientierung
- der Zelltyp
- der Modultyp
- der Wechselrichter
- Angaben zu Verlusten
- Klimadaten

Während nach EnEV 2014 nur die mittleren monatlichen Klimadaten des TRY verwendet werden, dienen für die PV-Simulation die stündlichen Werte. Die Leistung wird, wie in der EnEV-Bilanzierung, nach den Standardwerten für PV-System (siehe Abbildung 3) berechnet. Der Systemleistungsfaktor kann aber nicht als Eingabegröße eingegeben werden. Mit allen weiteren Eingabeparametern wird versucht sich den monatlichen Ergebnissen der EnEV-Bilanzierung möglichst genau anzunähern.

Die Simulation erzeugt stundengenaue Daten. Sollten verschiedene Dachflächen für die Anlage einbezogen werden, so wird die Simulation mehrmals durchgeführt und die Daten anschließend addiert.

Die gewonnenen Ergebnisse für die PV-Stromproduktion in kWh werden auf die von ZUB Helena berechneten Monatswerte normiert und stehen danach dem Tabellenblatt „stündlich“ des entwickelten EBD-Tools zur Verfügung.

3.2.3.2 Kraft-Wärme-Kopplung

Das Stundenprofil des mittels KWK erzeugten Stroms orientiert sich an dem Profil für Wärmeerzeugung der Heizung nach Kapitel 3.2.3.3. Es wird dabei vereinfacht von einem BHKW ohne Pufferspeicher ausgegangen. In diesem Fall wird der Strom genau dann produziert, wenn Wärme benötigt wird. Der Warmwasserbedarf wird vereinfachend nicht mit in das Profil aufgenommen.

3.2.3.3 Heizung

Hilfsenergie:

- Konstante Verteilung über den Monat

Strombedarf für Wärmeerzeugung:

- Vereinfachtes Stundenverfahren nach DIN EN 13790

Die Hilfsenergie H und WLA wird konstant auf alle Stunden eines Monats aufgeteilt. Eine Nachtabschaltung, welche in ZUB Helena gemäß DIN V 18599 mit einer Betriebszeit von 06:00-23:00 Uhr für die Raumheizung berücksichtigt wird⁴⁹, findet bei der Hilfsenergie zum Heizen keine Anwendung. Der Pumpenstrom würde bei einer Nachtabschaltung in der Zeit von 23:00 bis 06:00 Uhr zwar wegfallen, der Strom für die Regelungstechnik würde aber trotzdem durchgängig laufen. Vereinfachend wird deshalb eine über den Tag konstante Verteilung angenommen. Die Wohnungslüftungsanlage ist 24 Stunden am Tag in Betrieb und verteilt sich somit auch durchgängig auf den gesamten Monat.

Die Methode, um das Profil des Stroms für Wärmeerzeugung H zu generieren, richtet sich nach dem vereinfachten Stundenverfahren der DIN EN ISO 13790. Es wird dabei ein eigens entwickeltes Tool, welches die Berechnungen der DIN EN ISO 13790 umsetzt, verwendet. Mittels bestimmter Input-Werte berechnet das Tool den tatsächlichen Heizwärmebedarf eines Wohngebäudes unter Beachtung von Wärmegewinnen und -verlusten und der thermischen Masse des Gebäudes.

Input-Daten sind:

Wärmeverluste:

- Wärmeverluste durch Transmission opaker Bauteile:
 - U-Werte
 - Temperaturkorrekturfaktoren

⁴⁹ Vgl. DIN V 18599-10, Kapitel 5.

3 Beschreibung der Methodik

- Wärmeverluste durch Transmission der Fenster und Türen:
 - U-Werte
 - Temperaturkorrekturfaktoren
- Lüftungswärmeverluste:
 - konditioniertes Gebäudevolumen
 - Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage (falls vorhanden)

Interne Wärmegewinne:

- auf die Nettogrundfläche bezogener Pauschalwert [Wh/m²d]:
 - Einfamilienhaus: 45
 - Mehrfamilienhaus: 90

Solare Wärmegewinne:

- Globalstrahlung auf die Fensterflächen des Gebäudes

Weitere Eingabedaten:

- Außentemperatur
- Zulufttemperatur
- maximale Heizleistung des Wärmeerzeugers
- Betriebszeit des Wärmeerzeugers

Das Berechnungstool berücksichtigt die Speicherfähigkeit des Gebäudes, indem die Temperatur der Masse der Gebäudezone der vorherigen Stunde in die Berechnung der tatsächlichen Stunde mit einbezogen wird. Es kann auch eine Nachtabschaltung der Heizung eingestellt werden. Diese orientiert sich nach der oben bereits beschriebenen Betriebszeit der Heizung. Das Tool kann außerdem die Verwendung einer Klimaanlage in die Berechnungen einbeziehen. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Klimaanlage allerdings nicht betrachtet.

Das entwickelte Tool liefert dann stundengenaue Werte zum Heizwärmebedarf, welche in dieser Arbeit auf die Monatswerte des Stroms für Wärmeerzeugungen zum Heizen aus ZUB-Helena normiert werden.

In Abbildung 5 sind zwei beispielhafte Wochengänge für den Heizbedarf nach Verteilung des vereinfachten Stundenverfahrens der DIN V 18599 und Normierung auf die ZUB Helena Monatswerte dargestellt. Es handelt sich zum einen um ein Gebäude mit Passivhaus-Niveau und zum anderen um einen Altbau (Baualtersklasse 1958-68). Des Weiteren wurde eine Nachtabschaltung der Heizung eingestellt.

Deutlich zu erkennen ist der große Einfluss der solaren Einstrahlung auf den Heizbedarf des Passivhauses. Für den Altbau fällt dieser verhältnismäßig gering aus.

In Abbildung 6 ist außerdem zu erkennen, welche unterschiedlichen Auswirkungen die Nachtabstaltung der Heizung bei den verschiedenen Wärmeschutzstandards erzielt. Während die Raumtemperatur beim Passivhaus nachts nur bis zu 2°C gegenüber der Solltemperatur von 20°C sinkt, ist der Temperaturabfall beim Altbau enorm. Das erklärt auch den hohen Heizbedarf beim erneuten Einschalten der Heizung am Morgen (Abbildung 5).

Im Passivhaus steigt die Temperatur an sehr sonnigen Tagen über die Solltemperatur ohne dass dafür eine Heizleistung aufgewendet werden muss.

Abbildung 5: Wochengang Heizbedarf: Passivhaus und Altbau⁵⁰

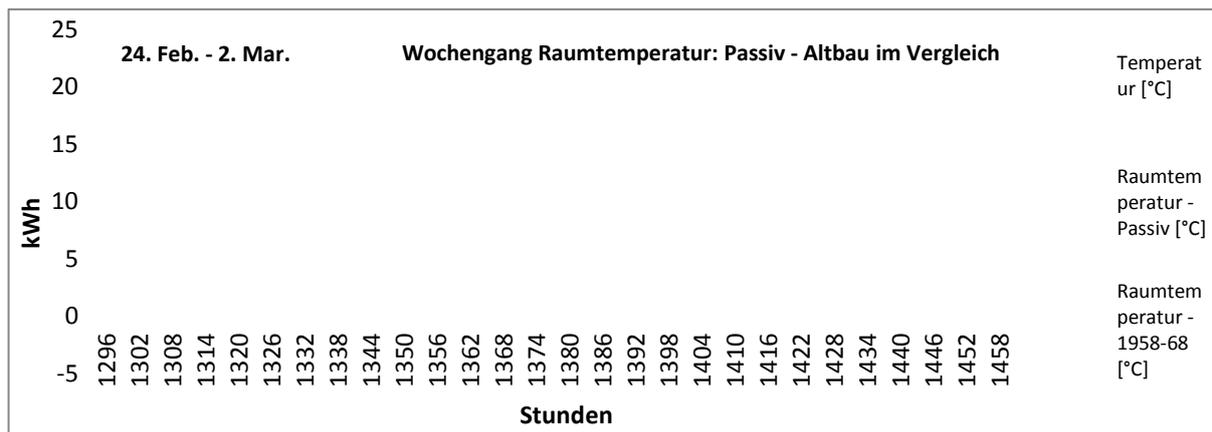


Abbildung 6: Wochengang Raumtemperatur: Passivhaus und Altbau⁵¹

⁵⁰ Abbildung selbst erstellt (06.08.14).

⁵¹ Abbildung selbst erstellt (06.08.14).

Die Normierung der Werte des Heizwärmebedarfs nach DIN EN 13790 auf die Monatswerte des Endenergiebedarfs entspricht einer Vereinfachung, da damit das Profil des Endenergiebedarfs mit dem des Heizwärmebedarfs gleichgesetzt wurde. Der Einsatz eines Pufferspeichers wird an dieser Stelle also nicht betrachtet. Übertragend kann man sagen, dass davon ausgegangen wird, dass die Anlage zur Wärmebereitstellung permanent so viel Heizenergie liefert, wie benötigt wird. Aufgrund dieser Annahme verhält sich der Endenergiebedarf zum Heizen nach dem gleichen Profil wie der Heizwärmebedarf.

Zu beachten ist außerdem, dass es vorkommen kann, dass das Stundenverfahren nach DIN EN 13790 für einen Monat keinen Heizwärmebedarf ermittelt, während in der EnEV-Bilanzierung aber ein Bedarf berechnet wird. Diese Divergenz könnte auftreten, weil in der Monatsbilanz nach DIN V 18599 die thermische Speicherfähigkeit des Gebäudes nicht auf den nächsten Monat übertragen wird. Das Aufheizen in den Sommermonaten wirkt sich also nicht positiv auf den Heizbedarf im Herbst aus. Im Stundenverfahren nach DIN EN ISO 13790 dagegen wird dieser Übertrag der gespeicherten Wärme berücksichtigt. Aufgrund dieser Tatsache könnte es passieren, dass nach dem Stundenverfahren nach DIN EN ISO 13790 erst zu einem späteren Zeitpunkt im Jahr die Heizung angeschaltet werden muss. Dadurch ist in diesen Monaten kein Stundenprofil vorhanden, nach welchem der eventuelle Strom für Wärmeerzeugung zum Heizen aufgeteilt werden könnte. Um diesen, teilweise auftretenden, Divergenzen im EBD-Tool gerecht zu werden, wird für die Monate in denen kein Stundenprofil vorhanden ist eine konstante Verteilung des Bedarfs auf die Betriebsstunden von 06:00 bis 23:00 Uhr vorgenommen. Diese Vereinfachung ist zulässig, da es sich ohnehin nur um einen geringen Endenergiebedarf handeln kann. Die Verteilung entspricht dann also in etwa einer eingeschalteten Heizung, welche aber wenig bis gar nicht genutzt wird.

3.2.3.4 Warmwasser

Hilfsenergie:

- Konstante Verteilung über den Monat

Strom für Wärmeerzeugung:

- Messdaten aus „Wiesbaden Lummerlund“

Der Hilfsstrom WW wird konstant über alle Stunden des Jahres aufgeteilt.

Für das Profil des Anteils Bedarfs WW wird ein Konzept zur Verteilung erstellt. Datengrundlage bieten hier die Messdaten einer im Rahmen des IWU durchgeführten Studie über eine Einfamilienhaussiedlung in Lummerlund in Wiesbaden⁵². Die Studie ist aus dem Jahr 1998-1999. Da es sich um eine Passivhaussiedlung handelt und

⁵² Vgl. Loga et al. (1999).

sich außerdem an der zeitlichen Verteilung des Warmwasserbedarfs über den Tag gesehen nicht wesentlich viel geändert haben sollte, stellt diese Tatsache keine wesentliche Einschränkung der Methodik dar. Es wurde damit begonnen aus den Messdaten einen prozentualen Tagesgang abzuleiten. Im Anschluss wird die Verteilung der monatlichen Werte der EnEV-Software auf die einzelnen Tage im Monat festgelegt. Zusammen ergeben die beiden Profile dann die stündliche Verteilung für ein ganzes Jahr.

Bei genauerer Untersuchung der Daten stellte sich heraus, dass eine Differenzierung der Tagesgänge nach Wochentagen notwendig ist. Ein allgemeines Tagesprofil wäre hier zu stark vereinfacht, da sich die Profile im zeitlichen Auftreten der Lastspitzen voneinander unterscheiden. In Abbildung 7 ist zu sehen, wie besonders die Profile der Wochenendtage von einem gemittelten Tagesprofil abweichen. Es kann aber von einer, über das Jahr gesehen, konstanten Verteilung ausgegangen werden, sodass sich insgesamt sieben verschiedene Tagesgänge ergeben. Diese setzen sich aus den jährlichen Mittelwerten der jeweiligen Wochentage zusammen.

Zum Vergleich wurde noch eine weitere Studie einer Niedrigenergiesiedlung in Niedernhausen herangezogen⁵³. In dieser sind Daten zu einem für das Jahr durchschnittlichen Tagesgang des Warmwasserbedarfs zu finden. Abbildung 8 zeigt, dass der grobe Verlauf der beiden gemittelten Daten ähnlich ist. Es sind jeweils eine Lastspitze am Morgen und am Abend zu erkennen. In der Zeit zwischen 12:00 und 17:00 Uhr unterscheiden sich die Profile jedoch voneinander. Dies verdeutlicht, wie abhängig konkrete Messwerte vom Nutzerverhalten der Bewohner sind. Obwohl beide Messreihen eine Wohnsiedlung und keinen einzelnen Haushalt abbilden, sind die Messwerte sehr spezifisch. Da aber die beiden wichtigen Lastspitzen morgens und abends deutlich abgebildet sind, bieten die Messwerte aus Lummerlund ein geeignetes Konzept zur Verteilung von Tageswerten auf Stundenwerte.

⁵³ Vgl. Brunnengräber/Loga (1996).

3 Beschreibung der Methodik

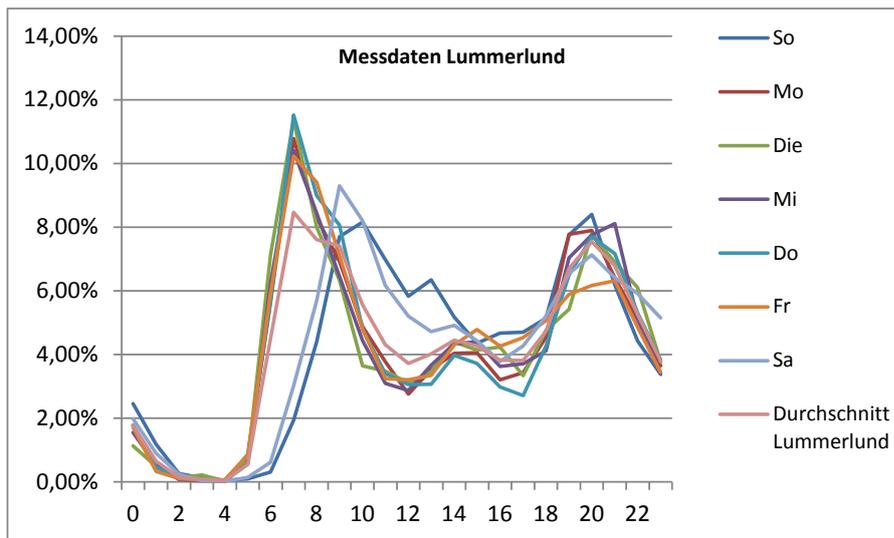


Abbildung 7: Warmwasser Messdaten Lummerlund⁵⁴

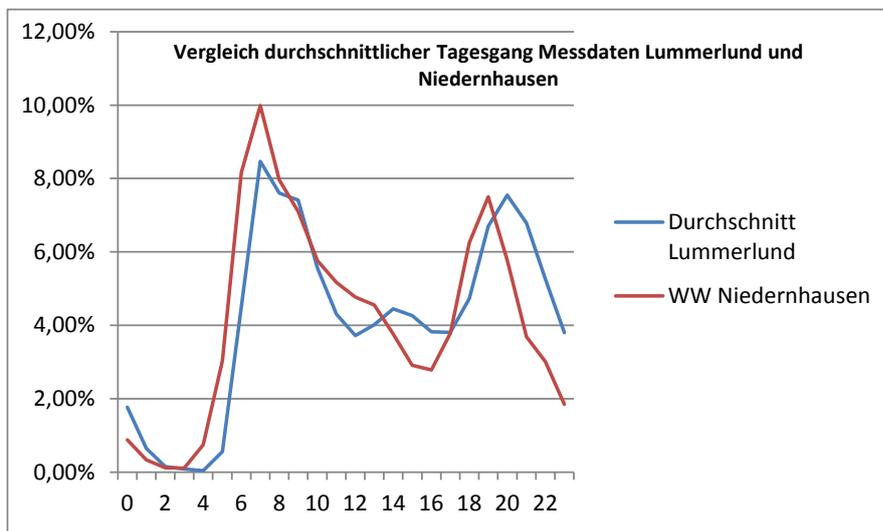


Abbildung 8: Vergleich der Messdaten⁵⁵

Um Stundenwerte für ein ganzes Jahr zu erhalten, muss das oben beschriebene Profil noch mit einem Konzept zur Verteilung der Monatswerte aus der EnEV-Software auf die einzelnen Tage im Monat kombiniert werden. Auch dieses wurde anhand der Messdaten aus Lummerlund entwickelt. Eine Unterscheidung nach Wochentagen, jedoch nicht nach Jahreszeiten erscheint hier ebenfalls sinnvoll. Eine besondere Herausforderung bei einer solchen Aufteilung ist, dass nicht jedem Wochentag ein fester Prozentwert zugeteilt werden kann, da jeder Monat eine unterschiedliche Anzahl des jeweiligen Tages enthält. Für jeden Wochentag wird also pro Monat ein anderer Prozentwert bestimmt.

⁵⁴ Abbildung selbst erstellt nach Messdaten Lummerlund (1998-99).

⁵⁵ Abbildung selbst erstellt nach Messdaten Lummerlund (1998-99) und Niedernhausen (1994).

3.2.3.5 Haushaltsstrom

Messdaten Niedernhausen

Die stündliche Verteilung des Haushaltsstroms ist sehr stark nutzerabhängig. Um dennoch ein geeignetes Stundenprofil zu finden, werden die Messdaten einer Niedrigenergiesiedlung in Niedernhausen verwendet. Für diese Siedlung wurden 1994 vom IWU ein Jahr lang stundengenaue Messdaten erhoben⁵⁶. Der durchschnittliche Stromverbrauch von Haushaltsgeräten ist in den letzten zwanzig Jahren zwar gesunken, um jedoch einen prozentualen Tagesgang abzubilden kommt es primär auf die Lastspitzen des Bedarfs an. Beim Auswerten der Messwerte stellte sich heraus, dass eine Unterscheidung der Tagesprofile nach Wochentagen, Samstagen, Sonntagen und zusätzlich nach Jahreszeiten sinnvoll ist. In Abbildung 9 und Abbildung 10 ist der Unterschied zwischen den Verläufen im Winter und im Sommer dargestellt. Daraus ergeben sich jeweils drei Tagesprofile für die folgenden Zeitschritte:

- Dezember – Februar
- März – Mai
- Juni – August
- September – November

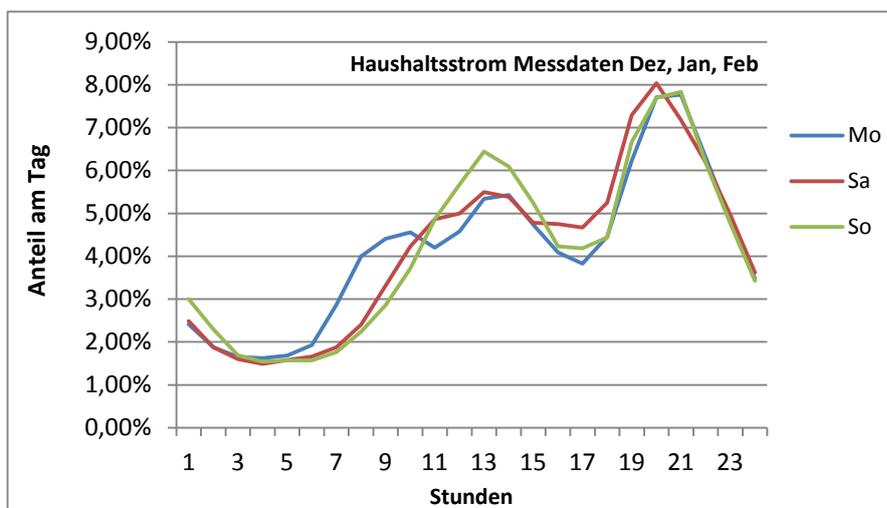


Abbildung 9: Messdaten Haushaltsstrom Winter⁵⁷

⁵⁶ Vgl. Brunnengräber/Loga (1996).

⁵⁷ Abbildung selbst erstellt nach Messdaten Niedernhausen (1994).

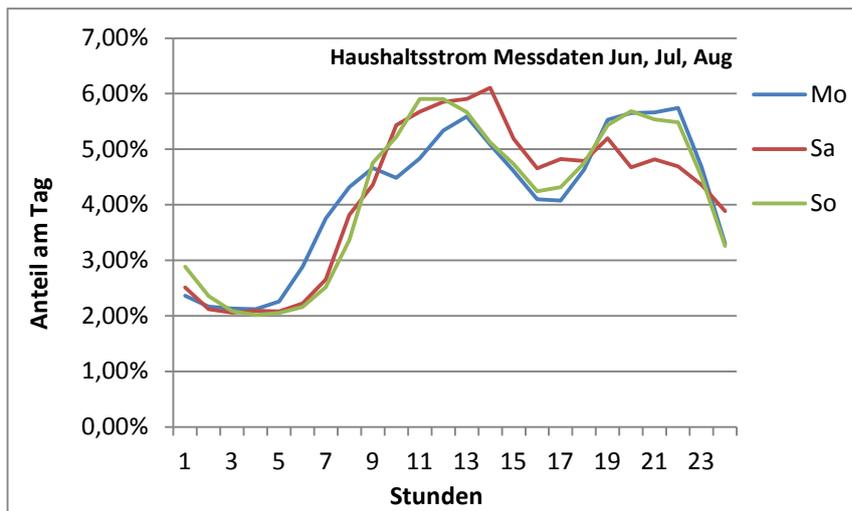


Abbildung 10: Messdaten Haushaltsstrom Sommer⁵⁸

3.2.4 Getroffene Vereinfachungen

Hier noch einmal ein Überblick über die im Text oben beschriebenen Vereinfachungen:

- WW-Daten sind von mehreren Reihenhäusern → abgeflachte Verbrauchskurve; die berechnete Verteilung wird auch bei Mehrfamilienhäusern verwendet.
- Haushaltsstrom-Profile für Reihenhäuser, werden trotzdem für alle verwendet → bei MFH wäre das Profil ausgeglichener, was zu höheren Eigenbedarfsdeckungsanteilen führen müsste
- Vereinfachtes Stundenverfahren zur Berechnung des Heizwärmebedarfs wird nur für EFH durchgeführt und vereinfacht auf alle Wohngebäude angewandt, da es nur um prozentuale Verteilung geht.
- Kein Pufferspeicher für WP, BHKW, Gas-Kessel
- Stündliches Profil der KWK richtet sich nur nach Verteilung von H und nicht nach H+WW
- Hilfsstrom für H und WW wird vereinfacht als über die Betriebszeit konstant angenommen

3.2.5 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des EBD-Tools sollen der erreichbare Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$ und das Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el} sein. Diese sol-

⁵⁸ Abbildung selbst erstellt nach Messdaten Niedernhausen (1994).

len in einer Grafik so dargestellt werden, dass der Eigenbedarfsdeckungsanteil eine Funktion des Verhältnisses Stromproduktion zu Strombedarf darstellt:

$$\alpha_{el,prod} = f(\gamma_{el})$$

Eine Kurve der Grafik setzt sich aus den Ergebnissen eines bestimmten Wohnhauses mit festgelegter Anlagentechnik, aber unterschiedlicher Größen der PV Stromproduktion zusammen. Der Verlauf der Kurve wird also durch die Höhe der Eigensstromproduktion durch PV bestimmt. Anhand dieser Kurven werden Tabellenwerte abgeleitet. Für bestimmte Werte des Verhältnisses Stromproduktion zu Strombedarf wird mittels linearer Interpolation der jeweilige Eigenbedarfsdeckungsanteil berechnet und in einer Tabelle dargestellt. Diese Tabellenwerte werden für die verschiedenen Verrechnungsschrittweiten und Verrechnungsräume erstellt. Damit kann bei der schnellen Bewertung eines Wohngebäudes anhand der vorhandenen Anlagentechnik und der Stromproduktion eine schnelle Aussage über den erreichbaren Eigenbedarfsdeckungsanteil getroffen werden.

4 Durchführung der Analyse

Im Zuge der Analyse wird die in Kapitel 3 erläuterte Vorgehensweise umgesetzt. Es wird eine auf Jahres-, Monats-, Tages- und Stundenebene basierende Ermittlung des Eigenbedarfsdeckungsanteils von Wohnhäusern erstellt. Um den Anwendungsbereich der Ergebnisse der Analyse möglichst breit zu gestalten, werden drei verschiedene Wohngebäude betrachtet. Es handelt sich dabei um die drei Wohngebäude, aus dem IWU Projekt EPISCOPE zur Integration von „Nearly Zero-Energy Buildings“ in die deutsche Gebäudetypologie⁵⁹. Die Gebäude, ein Einfamilienhaus (EFH), ein Reihenhaus (RH) und ein Mehrfamilienhaus (MFH), sind reale Gebäude, die in den letzten Jahren errichtet wurden (zwei davon entsprechen in Realität dem Passivhaus-Standard). Die Kenndaten aus Abbildung 11 wurden aus dem Entwurf des IWU Projekt-Berichts entnommen:

<p>Einfamilienhaus (EFH)</p> <p>Beheizte Wohnfläche: 160,4 m²</p> <p>Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV: 264,7 m²</p>	
<p>Reihenhaus (RH)</p> <p>Beheizte Wohnfläche: 133,4 m²</p> <p>Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV: 239,0 m²</p>	
<p>Mehrfamilienhaus (MFH)</p> <p>Beheizte Wohnfläche (Wohnungen): 1170 m²</p> <p>Gebäudenutzfläche A_N nach EnEV: 1458 m²</p>	

Abbildung 11: Gebäudetypen gemäß IWU Projekt EPISCOPE⁶⁰

⁵⁹ Loga et al. (2014).

⁶⁰ Abbildung entnommen aus Loga et al. (2014).

Um eine systematische Untersuchung der Eigenbedarfsdeckung durchzuführen, werden lediglich die äußeren Merkmale der Gebäudehülle beibehalten und die Parameter der Gebäude- und Anlagentechnik variiert.

Die Gebäudetechnik wird hinsichtlich ihres Wärmeschutzstandards abgewandelt, welcher anhand der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) definiert wird. Somit wird neben den U-Wert Standards der EnEV 2014 auch mit einer Variante zur Abbildung eines Passivhauses⁶¹ gearbeitet. Des Weiteren wird der KfW-Effizienzhaus-70 Standard umgesetzt, da dieser die neuen Anforderungen der EnEV ab 2016 relativ gut abbildet. Zusätzlich wird der Standard von Altbauten (Baualtersklasse 1958-68), nach den Merkmalen der deutschen Gebäudetypologie in die Betrachtung miteinbezogen⁶². In Tabelle 4 sind die verwendeten U-Werte für jedes Bauteil am Haus aufgeführt. Die eben erwähnten Standards beziehen sich nur auf das Wärmeschutzniveau. Da bei dieser Studie die Auswirkungen der Variation verschiedener Anlagentechniken untersucht werden sollen, genügen die Ergebnisse für den Primärenergiebedarf und den spezifischen Transmissionswärmeverlust nicht in allen Kombinationen den genannten Standards.

Variiert werden außerdem die Anlagentechnik zur Heizwärme- und Warmwassererzeugung, sowie die Anlagen zur Stromproduktion. So kommen eine Wärmepumpe, ein Brennwertkessel und eine Wohnungslüftungsanlage zum Einsatz. Die Stromerzeugung mittels regenerativer Energien erfolgt anhand einer PV-Anlage, ergänzend wird die Erzeugung von Strom durch ein BHKW analysiert. Zusätzlich zu den technischen Gegebenheiten wird auch der betrachtete Verrechnungsraum variiert, indem neben dem Strombedarf für die Anlagentechnik auch der Haushaltsstrombedarf in die Berechnungen mit einbezogen wird.

Im Folgenden wird in Kapitel 4.1 anhand einer Basisvariante die Durchführung der Analyse anschaulich erläutert. In Kapitel 4.2 werden alle weiteren betrachteten Varianten vorgestellt, welche nach dem gleichen Schema wie die Basisvariante erstellt wurden.

		Passivhaus	KfW 70	EnEV 2014	1958-68
Variante		1	2	3	4
U-Werte					
Dach	W/(m ² K)	0,1	0,16	0,2	2,1
Wand	W/(m ² K)	0,12	0,2	0,28	1,4
Fenster	W/(m ² K)	0,7	1,3	1,3	3
Tür	W/(m ² K)	0,8	1,8	1,8	3,5
Boden	W/(m ² K)	0,12	0,24	0,35	1
Wärmebrückenkorrekturwert	W/(m ² K)	0,02	0,02	0,05	0,1

Tabelle 4: U-Werte nach Standard⁶³

⁶¹ Im Folgenden wird vereinfachend von Passivhaus-Standard gesprochen. Dabei muss beachtet werden, dass die U-Werte typisch für Passivhaus-Neubauten sind, im Rahmen der Arbeit jedoch kein Nachweis nach Passivhaus-Projektierungspaket erbracht wurde.

⁶² IWU (2005).

⁶³ Abbildung selbst erstellt (09.07.14).

4.1 Basisvariante

Als Basisvariante wird ein Einfamilienhaus im Passivhausstandard mit einer Wärmepumpe, einer PV Anlage und einer Wohnungslüftungsanlage betrachtet (siehe Tabelle 5). Als Verrechnungsraum wird zum einen der Strombedarf für Anlagentechnik (Basis 1) und zum anderen der Strombedarf für Anlagentechnik und Haushaltsstrom (Basis 2) einbezogen. Die Durchführung der Basisvariante wird nach den Abschnitten „EnEV-Software“, „EBD-Tool“ und „Ergebnisgrafiken“ unterteilt.

Basisvariante	
Gebäude	Einfamilienhaus
Wärmeschutz-Standard	Passiv
Anlagentechnik	Wärmepumpe + WLA
Verrechnungsraum Basis 1	Heizung, Warmwasser + Hilfsenergie (H+WW+WLA)
Verrechnungsraum Basis 2	Heizung, Warmwasser + Hilfsenergie (H+WW+WLA) + Haushaltsstrom

Tabelle 5: Eckdaten Basisvariante⁶⁴

4.1.1 EnEV-Software

Für die Umsetzung der Basisvariante in ZUB-Helena werden die allgemeinen Gebäudedaten, in Bezug auf die Geometrie des Einfamilienhauses, die aus dem EPISCOPE-Projekt bereits existieren, übernommen. Die Gebäude- und Anlagentechnik wurde gemäß Aufgabenstellung definiert und angepasst. Außerdem ist darauf zu achten, dass in der ZUB-Helena-Software unter den Randbedingungen ein Nachweis nach EnEV 2014 und die Bilanzierung nach DIN V 18599 eingestellt ist.

Folgende Eingaben werden für die Gebäude- und Anlagentechnik in ZUB-Helena vorgenommen:

Gebäudetechnik:

- U-Werte für Passivhaus in [W/m²K]:
 - Dach: 0,1
 - Wand: 0,12
 - Fenster: 0,7
 - Tür: 0,8
 - Boden: 0,12

Anlagentechnik:

- Wärmeerzeuger H+WW: Wärmepumpe:
 - Vorlauftemperatur: 35°C

⁶⁴ Abbildung selbst erstellt (05.08.14).

- Rücklauftemperatur: 28°C
- Ausführungsart: Erdsonde
- Verteilung H: Fußbodenheizung
- Wohnungslüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
 - Wärmebreitstellungsgrad: 0,8
- Photovoltaikanlage:
 - Leistung: 9,19 kW_p
 - Systemleistungsfaktor: 0,75
 - Orientierung: Südost
 - Neigung: 30°

Für die angelegte Variante lässt sich anschließend der Ergebnisbericht aus ZUB-Helena ausgeben. Folgende Ergebnisse der Basisvariante aus der EnEV-Bilanzierung in Tabelle 6 werden für die weiteren Berechnungen verwendet:

Monat	PV [kWh]	Gesamt Warmwasser [kWh]	Gesamt Heizung [kWh]	Hilfsenergie WW [kWh]	Hilfsenergie H [kWh]	Hilfsenergie WLA [kWh]
1	236,1	127,4	323,90			
2	241,1	114,7	281,50			
3	585,2	125,5	139,90			
4	1.063,2	119,2	63,40			
5	1.165,3	120,9	65,50			
6	1.202,3	115,7	63,40			
7	1.088,3	118,4	65,50			
8	995,9	118,7	65,50			
9	730,3	116,9	63,40			
10	523,6	123,1	79,50			
11	188,8	121,8	267,80			
12	118,1	127,6	393,60			
	8.138,2	1.449,9	1.872,90	284,85	403,66	771,79

Tabelle 6: Verwendete Ergebnisse für Basisvariante aus ZUB Helena⁶⁵

Die Bilanzierung nach ZUB-Helena ist Abbildung 12 zu entnehmen. Es wird demnach ein Deckungsanteil von 70,7 % erreicht. Der Wert wird später noch mit dem im EBD Tool ermittelten Monatswerten verglichen, da diese beiden übereinstimmen müssen.

⁶⁵ Abbildung selbst erstellt aus ZUB Helena (28.07.14).

Strom aus erneuerbaren Energien nach §5 EnEV 2014

Monat	Strom regenerativ [kWh/Monat]	Korrekturen der Endenergie [kWh/Monat]	
		Warmwasser	Heizung
Januar	236,1	127,4	108,8
Februar	241,1	114,7	126,4
März	585,2	125,5	139,9
April	1.063,2	119,2	63,4
Mai	1.165,3	120,9	65,5
Juni	1.202,3	115,7	63,4
Juli	1.088,3	118,4	65,5
August	995,9	118,7	65,5
September	730,3	116,9	63,4
Oktober	523,6	123,1	79,5
November	188,8	121,8	67,0
Dezember	118,1	118,1	0,0
Gesamt	8.138,2	1.440,4	908,6

Endenergie (elektrisch)

	Bedarf [kWh/a]	gedeckt durch erneuerbare Energien [kWh/a]	Deckungsanteil
Heizung	1.873,1	908,6	48,5 %
Warmwasser	1.449,9	1.440,4	99,3 %
Gesamt	3.323,1	2.349,0	70,7 %

Photovoltaik gemäß DIN EN 15316-4-6

Spitzenleistung P_{pk} [kW]	9,2
Art des Photovoltaikmoduls	Monokristallines Silizium
Art der Gebäudeintegration	Mäßig belüftete Module, < 0,5 m auf Dach aufgesetzt
Systemleistungsfaktor f_{perf} [-]	0,75
Ausrichtung	Südost
Winkel	30°

Abbildung 12: Bilanz nach ZUB Helena für Basisvariante⁶⁶

4.1.2 Analyse im EBD-Tool

Die gewonnenen EnEV-Ergebnisse sollen anschließend im EBD-Tool verwendet werden.

Um die für die Parameterstudie umfangreiche Variation von Eingabedaten in das EBD-Tool zu vereinfachen wird ein vom IWU entwickeltes Ein- und Ausgabetool⁶⁷ verwendet, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit angepasst wurde. Eine Tabelle mit EBD-Eingabedaten wird sukzessive in das EBD-Tool übertragen und die jeweiligen EBD-Ergebnisse in eine zweite Tabelle geschrieben.

⁶⁶ Abbildung entnommen aus ZUB Helena (28.07.14).

⁶⁷ Vgl. IWU-internes Excel-Werkzeug „DataBoy.xlsm“.

Folgende Eingabedaten werden benötigt:

- Monatswerte aus EnEV-Software:
 - Stromproduktion
 - Strom für Wärmeerzeugung WW
 - Strom für Wärmeerzeugung H
- Jahreswerte aus EnEV-Software:
 - Hilfsenergie WW
 - Hilfsenergie H
 - Hilfsenergie WLA
- Weitere Angaben:
 - Stromproduktion KWK (monatlich)
 - Haushaltsstrombedarf (monatlich)
 - Gebäudetyp
 - Wärmeschutzstandard

Mit den Informationen zum Gebäudetyp und Wärmeschutzstandard werden in den Hilfstabellen des EBD-Tools die zum Einfamilienhaus zugehörige PV-Simulation und die Werte des vereinfachten Stundenverfahrens zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs für den Passivhausstandard aufgerufen.

4.1.3 Ergebnisse der Basisvariante

Verrechnungsschrittweite Monat

Die Monatswerte der beiden Basisvarianten Basis 1 (Verrechnungsraum Anlagentechnik) und Basis 2 (Verrechnungsraum Anlagentechnik und Haushaltsstrom) sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 im Balkendiagramm aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist hier der antizyklische Verlauf der Stromproduktion und des Heizbedarfs. Da es sich bei der Basisvariante um einen Wärmeschutzstandard nach Passivhausniveau handelt ist der Heizbedarf verhältnismäßig gering. Der Warmwasserbedarf verhält sich über das Jahr gesehen relativ konstant, ebenso der Haushaltsstrom in Basis 2. Zu erkennen ist bereits, dass der Strombedarf, aufgrund der hohen PV-Stromproduktion in den Monaten März bis Oktober und des niedrigen Heizbedarfs in den Übergangszeiten, nur in den Monaten November bis Februar nicht vollständig durch die eigene Stromproduktion gedeckt werden kann. In den Monaten hoher PV-Stromproduktion kann auch der zusätzliche Anteil des Haushaltsstroms ohne Probleme gedeckt werden. Nur in den Wintermonaten führt die Berücksichtigung des Haushaltsstroms zu einem erhöhten Strombezug aus dem Netz.

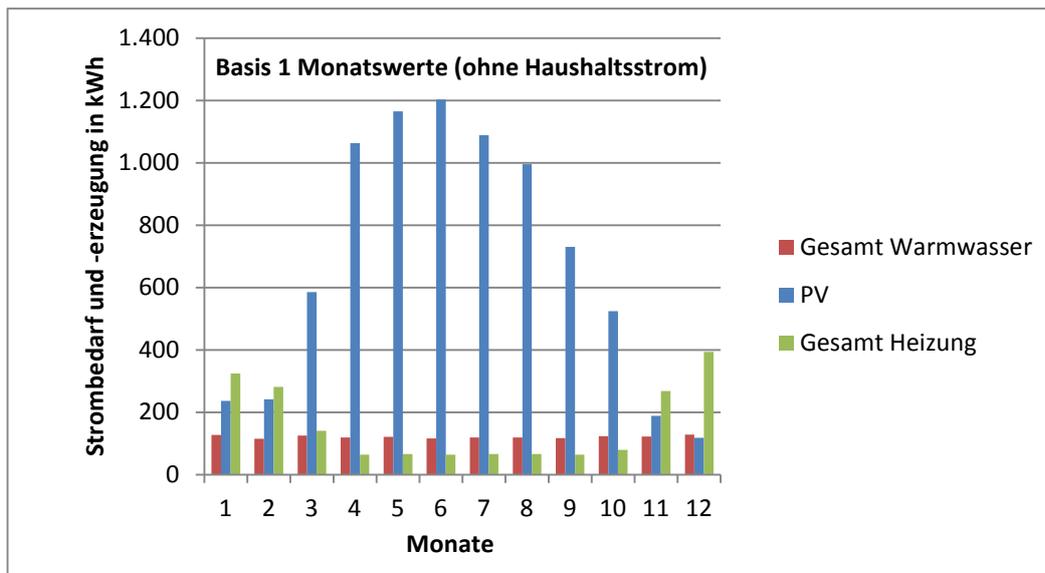


Abbildung 13: Monatswerte Basis 1⁶⁸

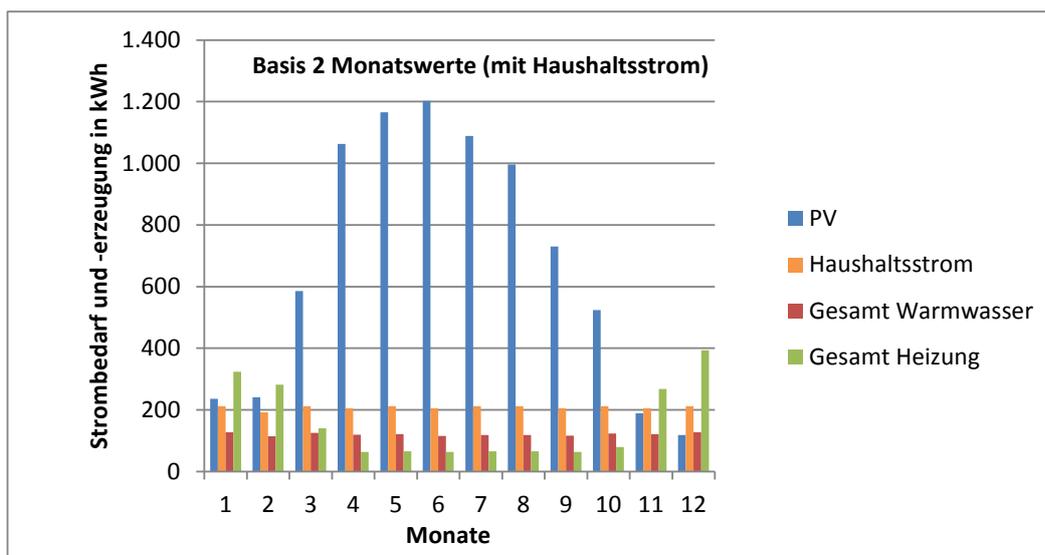


Abbildung 14: Monatswerte Basis 2⁶⁹

Verrechnungsschrittweite Stunde: beispielhafte Tagesgänge Sommer

Für die Veranschaulichung der stündlichen Verrechnung von Stromproduktion und Strombedarf ist in Abbildung 15 ein beispielhafter Wochenverlauf im Sommer abgebildet. Der Strombedarf besteht nur aus der Lüftungsanlage und dem Warmwasserbedarf. Zu erkennen ist, dass der größte Anteil des Bedarfs durch die PV gedeckt

⁶⁸ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

⁶⁹ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

werden kann. Nur in den Abendstunden kann ein Anteil des Warmwasserbedarfs nicht gedeckt werden. Zu erkennen ist auch, wie abhängig die PV Stromproduktion vom Wetter ist. In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass die hohe Stromproduktion zur Mittagszeit auch zur Deckung des Haushaltsstrombedarfs beiträgt.

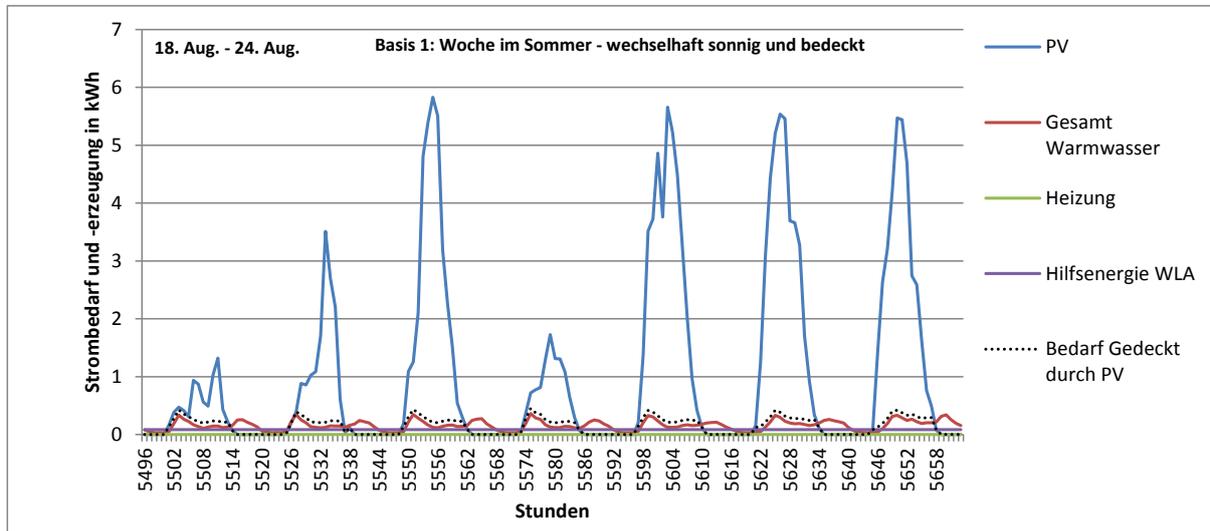


Abbildung 15: Wochenverlauf Strombedarf und -erzeugung Sommer Basis 1⁷⁰

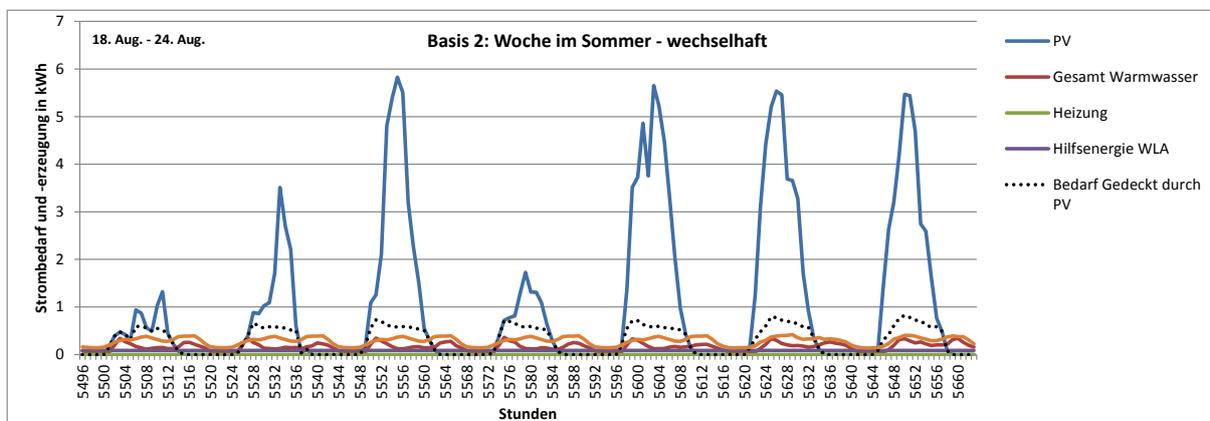


Abbildung 16: Wochenverlauf Sommer Basis 2⁷¹

Verrechnungsschrittweite Stunde: Beispielhafte Tagesgänge Winter

Die gleiche Darstellung der Stundenwerte wird auch für den Winter verwendet. Hier sind jeweils zwei beispielhafte Wochen ausgesucht worden: Eine trübe Woche mit geringer PV-Stromproduktion (Abbildung 17 und Abbildung 19) und zum anderen eine sonnige Woche (Abbildung 18 und Abbildung 20). Der Einfluss des Wetters ist

⁷⁰ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

⁷¹ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

4 Durchführung der Analyse

hier für die Eigenbedarfsdeckung durch die PV-Stromproduktion besonders hoch. An trüben Tagen wird der komplette Anteil der PV zur Eigenbedarfsdeckung verwendet, dieser stellt allerdings keinen hohen Anteil am Strombedarf dar. An sonnigen Tagen kann dann wiederum ein hoher Anteil des Strombedarfs durch die PV gedeckt werden. Da es sich bei dem Wärmeschutz um ein Passivhaus-Niveau handelt, sinkt der Heizbedarf an den sonnigen Tagen aufgrund der solaren Wärmegewinne stark ab.

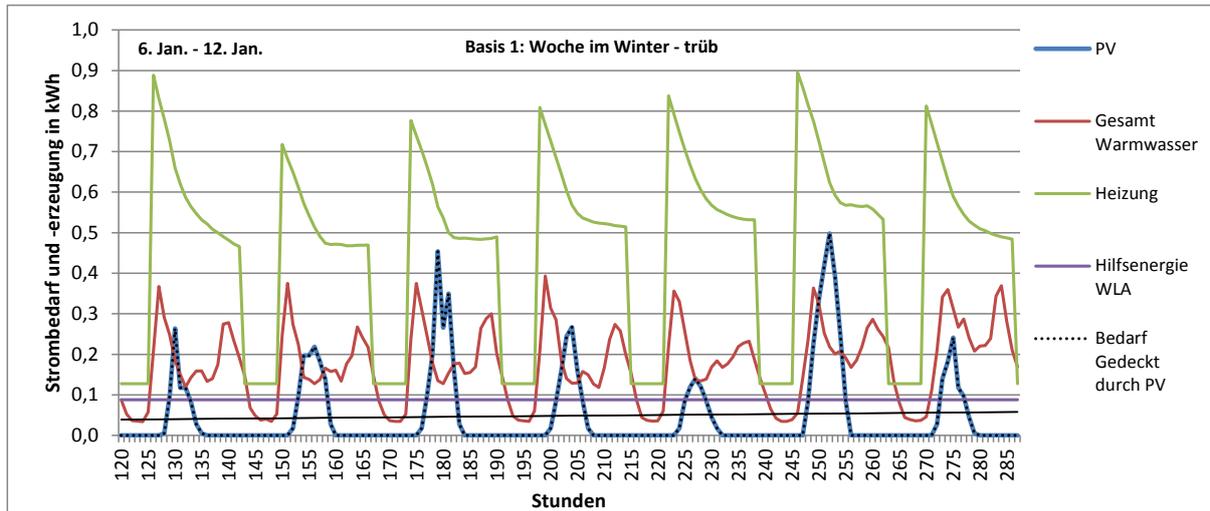


Abbildung 17: Stundenverlauf Basis 1 - Winter (trüb)⁷²

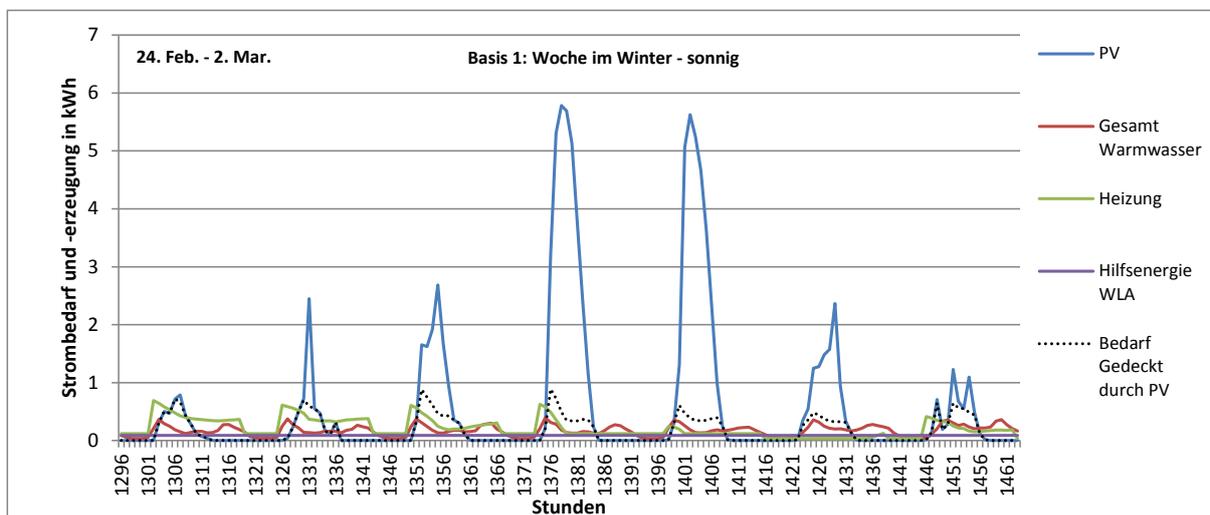


Abbildung 18: Stundenverlauf Basis 1 - Winter (sonnig)⁷³

⁷² Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

⁷³ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

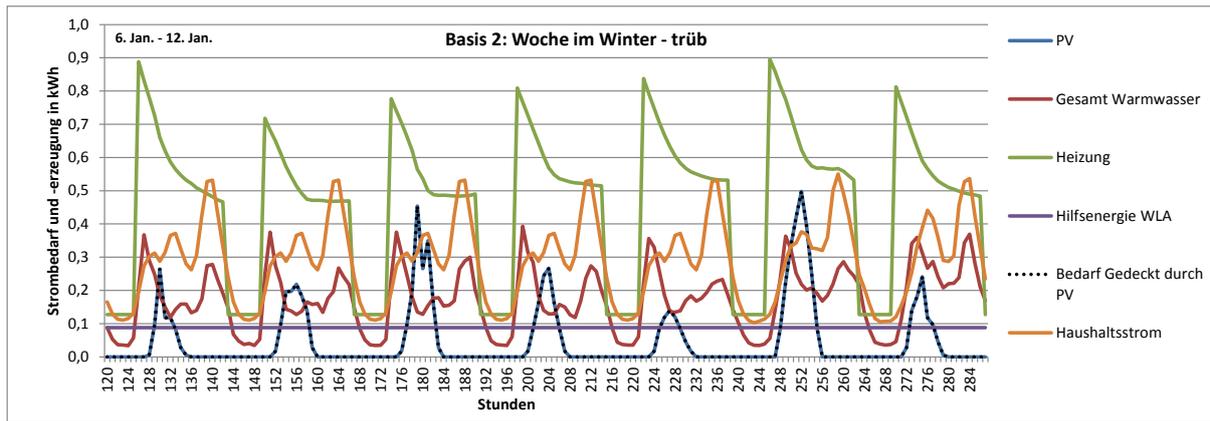


Abbildung 19: Stundenverlauf Basis 2 - Winter (trüb)⁷⁴

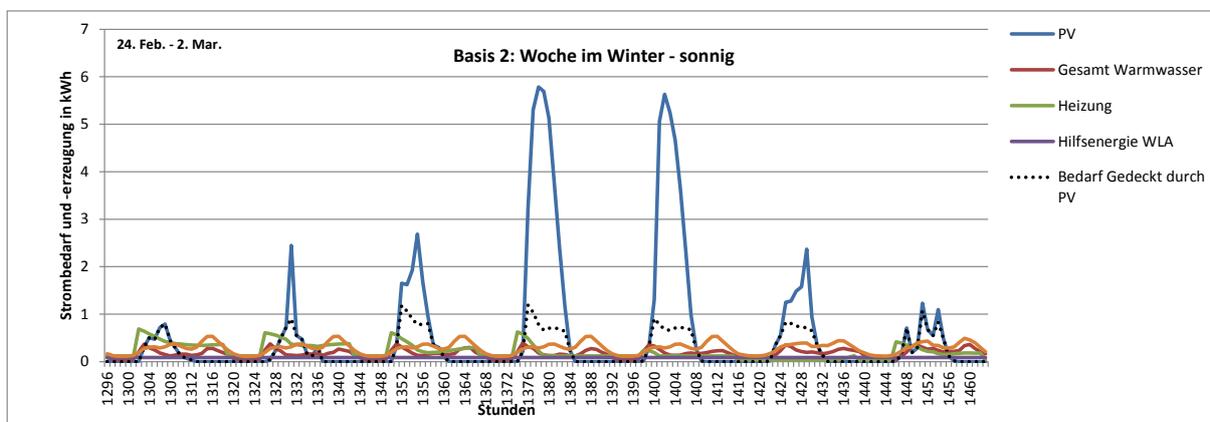


Abbildung 20: Stundenverlauf Basis 2 - Winter (sonnig)⁷⁵

Vergleich der Verrechnungsschrittweiten

In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die Jahreswerte der Ergebnisse in Abhängigkeit der Verrechnungsschrittweite aufgeführt.

Basis 1	PV [kWh]	Gesamt WW [kWh]	Gesamt H [kWh]	gedeckt durch PV [kWh]	Eigenbedarfsdeckungsanteil	Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf
Jahr	8.138,20	1.449,90	1.872,90	3.322,80	1,00	2,45
Monat	8.138,20	1.449,90	1.872,90	2.348,60	0,71	2,45
Tag	8.138,20	1.449,90	1.872,90	2.180,32	0,66	2,45
Stunde	8.138,20	1.449,90	1.872,90	1.208,79	0,36	2,45

Tabelle 7: Jahresergebnisse nach Verrechnungsschrittweite Basis 1⁷⁶

⁷⁴ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

⁷⁵ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

⁷⁶ Tabelle selbst erstellt (04.08.14).

4 Durchführung der Analyse

Basis 2	PV [kWh]	Gesamt Hstrom [kWh]	Gesamt WW [kWh]	Gesamt H [kWh]	gedeckt durch PV [kWh]	Eigenbedarfsdeckungsanteil	Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf
Jahr	8.138,20	2.500,00	1.449,90	1.872,90	5.822,80	1,00	1,40
Monat	8.138,20	2.500,00	1.449,90	1.872,90	4.026,68	0,69	1,40
Tag	8.138,20	2.500,00	1.449,90	1.872,90	3.692,91	0,63	1,40
Stunde	8.138,20	2.500,00	1.449,90	1.872,90	2.081,44	0,36	1,40

Tabelle 8: Jahreswerte nach Verrechnungsschrittweite Basis 2⁷⁷

Die Abhängigkeiten der Eigenbedarfsdeckung von der Verrechnungsschrittweite sind sehr deutlich in den Säulendiagrammen in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt. Der blaue Balken steht für die Höhe des gesamten Endenergiebedarfs elektrisch. Rechts davon ist für die jeweiligen Zeitschrittweiten dargestellt, wie viel des Strombedarfs durch die PV Stromproduktion gedeckt werden kann. Die Differenz aus Bedarf und Produktion ist dann der Anteil, der vom Netz bezogen wird. Der Unterschied zwischen der monatlichen und der stündlichen Betrachtung ist sehr prägnant, sowohl in der Verrechnung ohne, als auch mit Haushaltsstrom. Der Unterschied zwischen monatlicher und täglicher Verrechnung fällt dagegen eher gering aus.

Die Werte für Basis 1 sind in Abbildung 21 als Absolutwerte dargestellt, in Abbildung 23 sind sie ein weiteres Mal bezogen auf die beheizte Wohnfläche dargestellt.

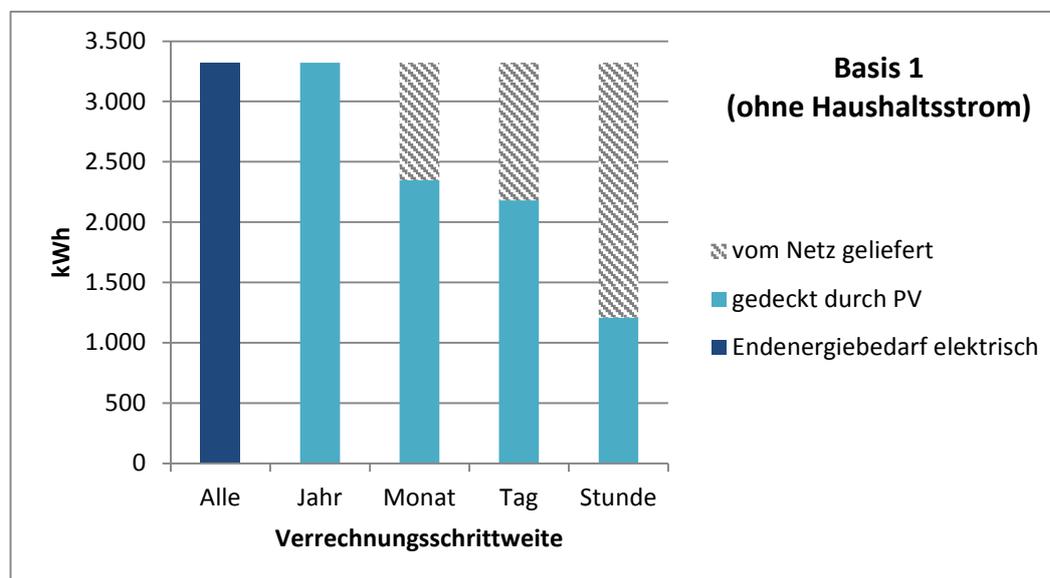


Abbildung 21: Säulendiagramm Basis 1⁷⁸

⁷⁷ Tabelle selbst erstellt (04.08.14).

⁷⁸ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

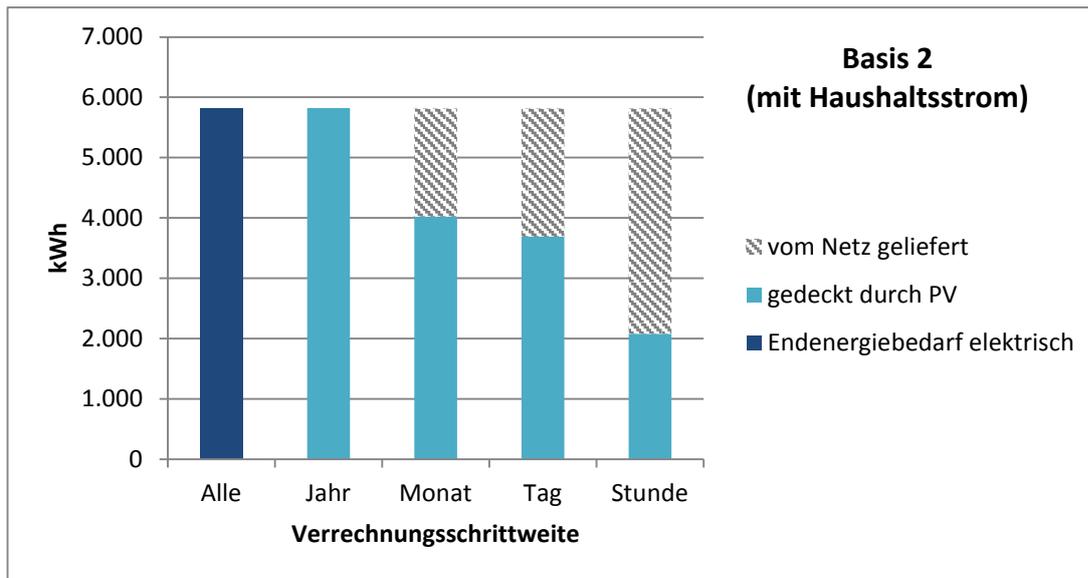


Abbildung 22: Säulendiagramm Basis 2⁷⁹

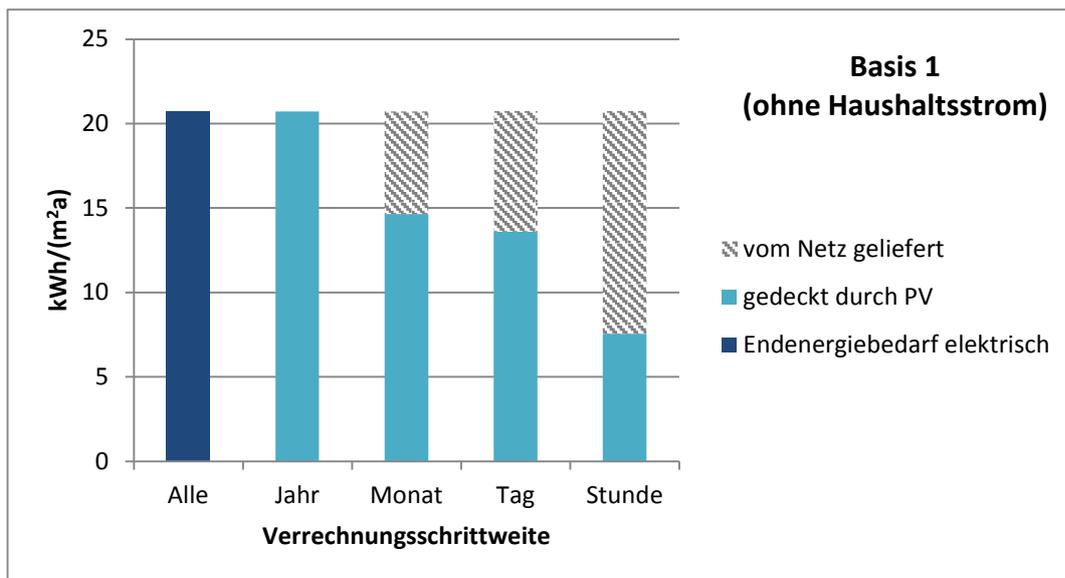


Abbildung 23: Säulendiagramm Energiekennwerte pro m² beheizte Wohnfläche Basis 1⁸⁰

⁷⁹ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

⁸⁰ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

Ableichung der Ergebnisse der EnEV-Bilanzierung mit denen des EBD-Tools

An den monatlichen Werten der Basisvariante ohne Haushaltsstrom aus Abbildung 13 und dem Eigenbedarfsdeckungsanteil aus Tabelle 7 ist zu erkennen, dass die Verrechnung auf Monatsebene des EBD-Tools mit der EnEV-Bilanzierung aus ZUB Helena übereinstimmt. Wie in dem Ergebnisbericht aus ZUB Helena (siehe Abbildung 12) wird ein Eigenbedarfsdeckungsanteil von 70,7 % erreicht.

Eigenbedarfsdeckungsanteil und Verhältnis Stromproduktion zu -bedarf

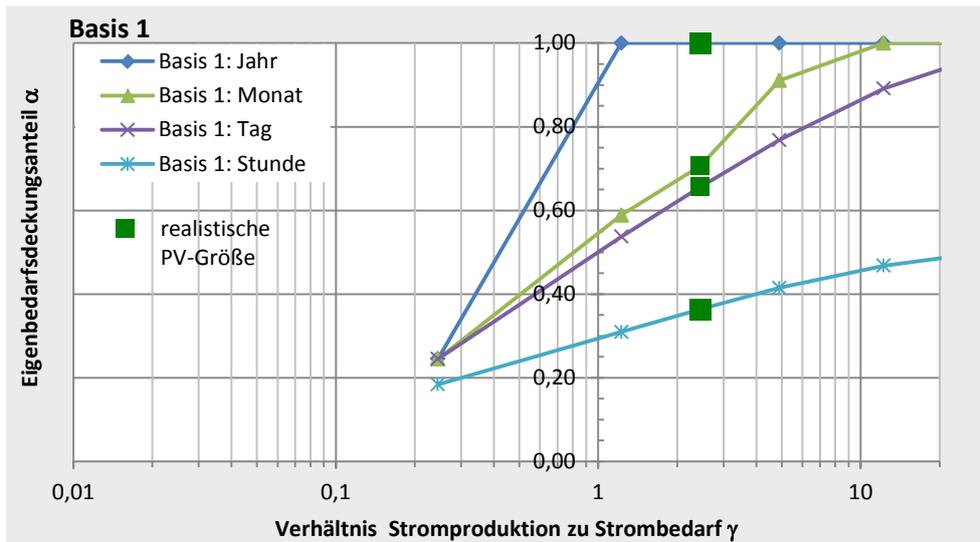
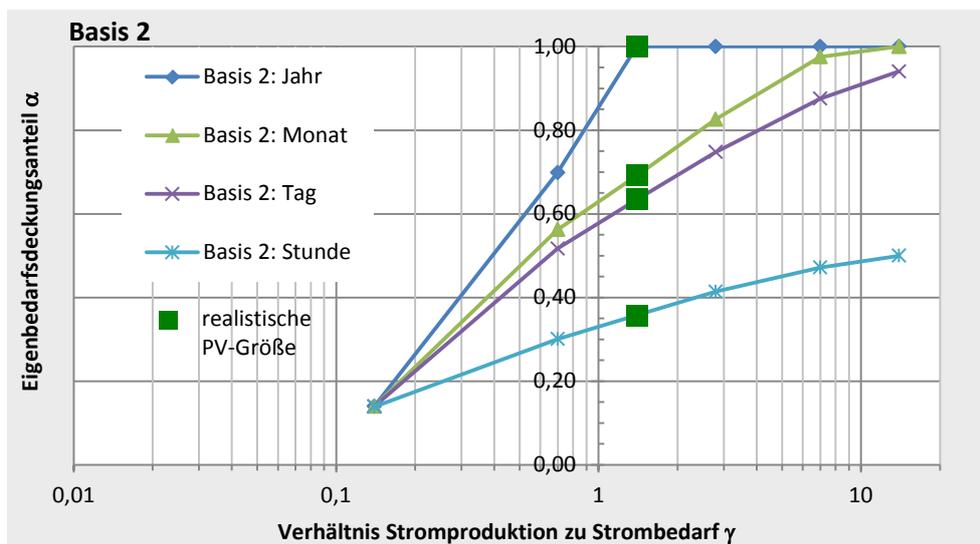
In den Grafiken Abbildung 24 und Abbildung 25 sind, wie schon in Kapitel 3.2.5 genauer erläutert, die Verläufe des Eigenbedarfsdeckungsanteils für die Verrechnungsschrittweiten Jahr, Monat, Tag und Stunde als Funktion des Verhältnisses Stromproduktion zu Strombedarf abgebildet.

Um einen Verlauf abbilden zu können, wird die Größe der PV-Stromproduktion variiert, was wiederum Auswirkungen auf das Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf und den zugehörigen Eigenbedarfsdeckungsanteil hat. Die Stromproduktion der realistischen Anlagengröße wird dafür mit den in Tabelle 9 erkennbaren sechs verschiedenen Faktoren multipliziert. Die daraus entstehenden Werte für Stromproduktion sollen von der Größenordnung nicht unbedingt einer realistischen Auslegung der PV-Anlage entsprechen, sondern dienen hauptsächlich zur Darstellung des Verlaufs. Die Größe „PV3“ (Faktor 1) stellt dabei die realistisch am Gebäude umsetzbare PV-Anlage dar und wird in den Abbildungen entsprechend farblich gekennzeichnet. Der Strombedarf bleibt je Variante konstant.

Stromerzeugung	
Photovoltaik	
Code	Beschreibung
PV	Verlauf
PV1	Faktor 0,1
PV2	Faktor 0,5
PV3	Faktor 1
PV4	Faktor 2
PV5	Faktor 5
PV6	Faktor 10

Tabelle 9: Variation der Größe der PV-Anlage⁸¹

⁸¹ Abbildung selbst erstellt (02.08.14).

Abbildung 24: Ergebnisgrafik Basis 1 (ohne Haushaltsstrom)⁸²Abbildung 25: Ergebnisgrafik Basis 2 (mit Haushaltsstrom)⁸³

Deutlich ist bei beiden Varianten zu erkennen, wie stark der Eigenbedarfsdeckungsanteil von der zugrunde gelegten Verrechnungsschrittweite abhängt. Die Kurve des Eigenbedarfsdeckungsanteils steigt bei stündlicher Schrittweite weniger steil an als bei täglicher, monatlicher oder jährlicher Schrittweite.

In der jährlichen Betrachtungsweise ist bis auf bei PV1 (Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf von 0,24) immer 100 % Eigenbedarfsdeckungsanteil zu erreichen. Dies liegt an dem geringen Jahresstrombedarf bei Passivhaus-Niveau.

⁸² Abbildung selbst erstellt (02.08.14).

⁸³ Abbildung selbst erstellt (02.08.14).

Im Monatsbereich wird für PV5 (Verhältnis 12,3) und PV6 (Verhältnis 24,5) immerhin noch 100% erreicht. Für PV1-3 (Verhältnis 0,24 - 2,5) liegen die Deckungsanteile, ähnlich wie auf der Tagesebene, bei 25-70 %.

Auf Stundenebene liegen die erreichbaren Deckungsanteile deutlich unter denen der Monatswerte. Das liegt daran, dass bei Betrachtung auf Stundenebene die tageszeitlichen Unterschiede zwischen der Stromproduktion und dem Strombedarf berücksichtigt werden. Die Stromproduktion der PV Anlage erfolgt hauptsächlich mittags und trägt damit nicht zu Eigenbedarfsdeckung des abendlichen und nächtlichen Stromverbrauchs bei. Aus diesem Grund kann durch eine erhebliche Vergrößerung der PV-Anlage (bis zu Faktor 10) der Eigenbedarfsdeckungsanteil bei der stündlichen Verrechnungsschrittweite nur in geringem Maße, bis maximal 50% erhöht werden. Bei monatlicher Verrechnungsschrittweite erhöht sich der Eigenbedarfsdeckungsanteil jedoch mit steigender PV-Anlagegröße stark, da der Tag-/ Nacht Unterschied zwischen Erzeugung und Bedarf nicht berücksichtigt wird.

Im Vergleich der beiden Verrechnungsräume muss beachtet werden, dass bedingt durch die Definition von γ alle Datenpunkte der Variante Basis 2 mit Haushaltsstrom etwas nach links verschoben sind, da durch Einbezug des Haushaltsstromes der Strombedarf steigt und das Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf somit sinkt. Gleichzeitig sind bei gleichem Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf die Eigenbedarfsdeckungsanteile gestiegen. Grund dafür ist, dass der Haushaltsstrom im Jahresverlauf gleich verteilt ist, während der Strombedarf für die Wärmepumpe verstärkt in den Wintermonaten auftritt. Die Diskrepanz zwischen dem Jahresverlauf von Stromproduktion und Strombedarf wird bei Einbezug des Haushaltsstroms damit etwas geringer. Es kann also bei gleichem Verhältnis der Jahreswerte von Stromproduktion zu Strombedarf bei Betrachtung kleinerer Zeitschritte mehr gedeckt werden, als in der Variante ohne Haushaltsstrom.

Tabellenwerte

In Tabelle 10 ist das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Tabellenwerk am Beispiel der beiden Basisvarianten aufgeführt. Der Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$ wird in Abhängigkeit des Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el} angegeben. Die Tabellenwerte für $\alpha_{el,prod}$ wurden zwischen den für bestimmte PV-Anlagengrößen berechneten Werten linear interpoliert. Nur für den Verrechnungszeitraum „Jahr“ wird keine Interpolation angewendet, denn es gilt per Definition:

$$\alpha_{el,prod} = \gamma_{el} \text{ für } \gamma_{el} < 1 \text{ und } \alpha_{el,prod} = 1 \text{ für } \gamma_{el} \geq 1$$

Die Abweichung zu Abbildung 24 und Abbildung 25 ergibt sich daher, dass die Funktionen in den Grafiken aus Verbindungen der einzelnen Datenpunkte bestehen und daher nur eine Annäherung darstellen.

Das umfassende Tabellenwerk befindet sich in Anhang C.

Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el}	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
Jahr	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
Basis 1 (ohne Haushaltsstrom)	1%	10%	25%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Basis 2 (mit Haushaltsstrom)	1%	10%	25%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el}	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
Monat	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
Basis 1 (ohne Haushaltsstrom)	1%	10%	25%	33%	51%	62%	66%	75%	91%	97%
Basis 2 (mit Haushaltsstrom)	1%	10%	22%	41%	62%	70%	75%	83%	90%	99%
Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el}	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
Tag	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
Basis 1 (ohne Haushaltsstrom)	1%	10%	25%	32%	47%	56%	61%	68%	77%	85%
Basis 2 (mit Haushaltsstrom)	1%	10%	21%	38%	57%	64%	68%	75%	82%	90%
Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el}	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
Stunde	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
Basis 1 (ohne Haushaltsstrom)	1%	8%	18%	22%	28%	32%	34%	38%	42%	45%
Basis 2 (mit Haushaltsstrom)	1%	10%	17%	24%	33%	36%	38%	42%	44%	48%

Tabelle 10: Tabellenwerte Basis 1 + 2⁸⁴⁸⁴ Tabelle selbst erstellt (01.08.14).

4.2 Parametervariation

Folgende drei Parameter sollen variiert werden:

- Wärmeschutzstandard
- Anlagentechnik
- Gebäudetyp

Würde die Auswertung in gleicher Weise wie in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt werden, dann ergäben sich unter Beachtung der beiden Verrechnungsräume:

$$4 \times 4 \times 3 \times 2 = 69 \text{ Grafiken}$$

Um aber den Einfluss der Veränderungen jedes einzelnen Parameters isoliert betrachten zu können, wird im Folgenden systematisch vorgegangen. Durch die gezielte Variation eines einzelnen Parameters unter Beibehaltung der anderen Parameter der Basisvariante, können die Ergebnisse anschaulich dargestellt werden.

Eine Einschränkung wird für den Verrechnungsraum vorgenommen. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse unter Einbeziehung des Haushaltsstroms betrachtet, Basisvariante ist also Basis 2.

Außerdem findet eine Einschränkung auf die Darstellung der Monats- und Stundenkurve statt. Diese beiden Kurven sind für den Vergleich besonders relevant und haben in Abbildung 24 und Abbildung 25 deutliche Unterschiede aufgewiesen.

Dadurch ergeben sich drei Grafiken, je eine zur Untersuchung des Einflusses des Wärmeschutzstandards, der Anlagentechnik und des Gebäudetyps. Auf die Ergebnisse wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Zusätzlich zu den betrachteten Varianten sind die Ergebnisse aller Variantenkombinationen in einer Tabelle im Anhang aufgelistet.

4.2.1 Einfluss des Wärmeschutzstandards

Basis 2 + Wärmeschutz variiert

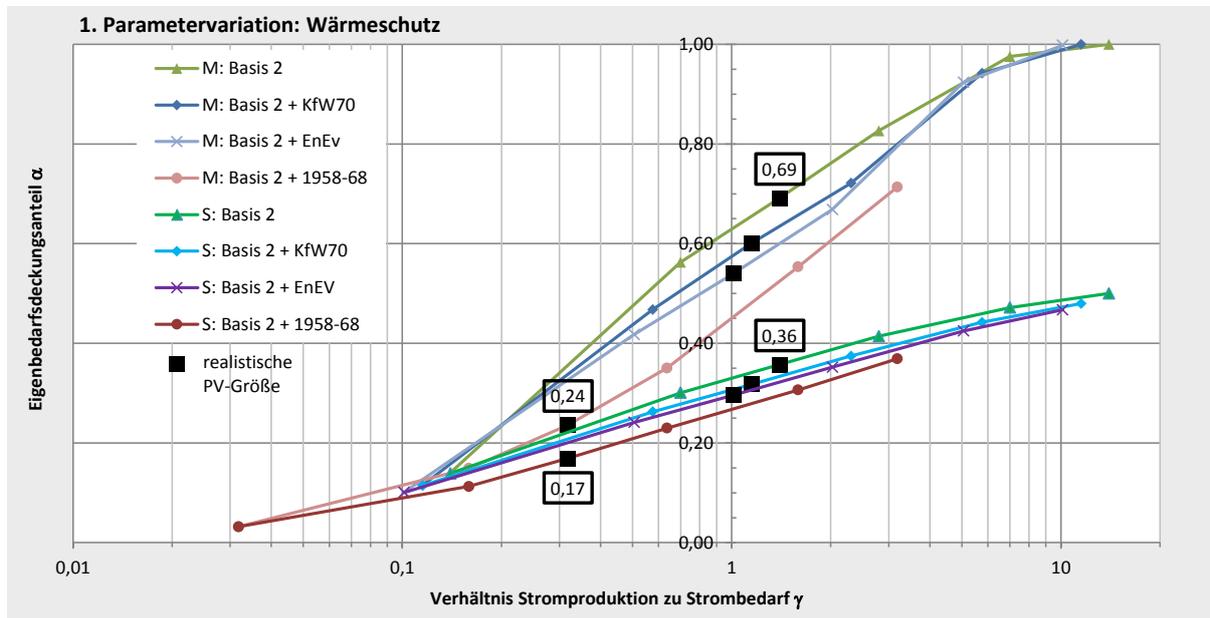


Abbildung 26: Parametervariation Wärmeschutz⁸⁵

In Abbildung 26 wird erkennbar, dass bei gleichem Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf höhere Eigenbedarfsdeckungsanteile erzielt werden, je besser der Wärmeschutz ist. Auf Monatebene ist dieser Unterschied noch prägnanter zu erkennen als auf der Stundenebene. Der Grund dafür ist, dass die Differenz des Strombedarfs auf Monatebene zwischen Sommer und Winter bei Bestandsgebäuden sehr viel größer ausfällt als beim Passivhaus und damit auch die Antikorrelation zwischen Strombedarf und PV Stromproduktion größer ist. Bei stundenweiser Verrechnung ist der Unterschied zwischen Passivhaus und Bestandsgebäude bei gleichem Verhältnis von Stromproduktion zu -bedarf dagegen nur minimal. Grund dafür ist, dass an Tagen an denen eine große Eigenbedarfsdeckung erzielt wird, die Korrelation der Tagesgänge von Strombedarf und PV-Produktion bei beiden Gebäudestandards ähnlich ist.

Weiterhin ist zu sehen, dass die Datenreihen unterschiedliche Start- und Endpunkte auf der x-Achse haben. Hier bildet sich der Sachverhalt ab, dass bei einem schlechten Wärmeschutzstandard eine erheblich größere PV Anlage benötigt wird um die gleiche Eigenbedarfsdeckung erzielen zu können wie bei einem guten Wärmeschutzstandard. Beim Vergleich der realistischen PV Anlagengröße (Faktor 1), der Basisvariante (Passivhaus) und der Altbauvariante (1958-68) kann dieser Tatbestand deutlich dargestellt werden. Die jeweiligen Datenpunkte der monatlichen und

⁸⁵ Abbildung selbst erstellt (02.08.14).

stündlichen Verrechnung sind durch einen Rahmen markiert dargestellt. Zuerst einmal zeigt sich, dass die Altbauvariante (1958-68) mit der realistischen PV-Anlagengröße ein Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf $\gamma_{el} < 1$ aufweist. Dieses Gebäude kann lediglich 32 % seines benötigten Stromes im Jahresverlauf selbst erzeugen. Das Passivhaus kann dagegen mehr Strom erzeugen als im Jahresverlauf benötigt ($\gamma_{el} = 140\%$). Dies hat entsprechende Auswirkungen auf den erzielbaren Eigenbedarfsdeckungsanteil. Auf Stundenebene liegt der Eigenbedarfsdeckungsanteil für die realistische PV-Größe der Altbau-Variante bei 0,17, bei der Passivhausvariante dagegen bei 0,36. Auf Monatsebene ist der Unterschied noch größer. Von 0,24 bei der Altbau Variante zu 0,69 erreichbarem Eigenbedarfsdeckungsanteil bei der Passivhausvariante.

4.2.2 Einfluss der Anlagentechnik

Basis 2 + Anlagentechnik variiert

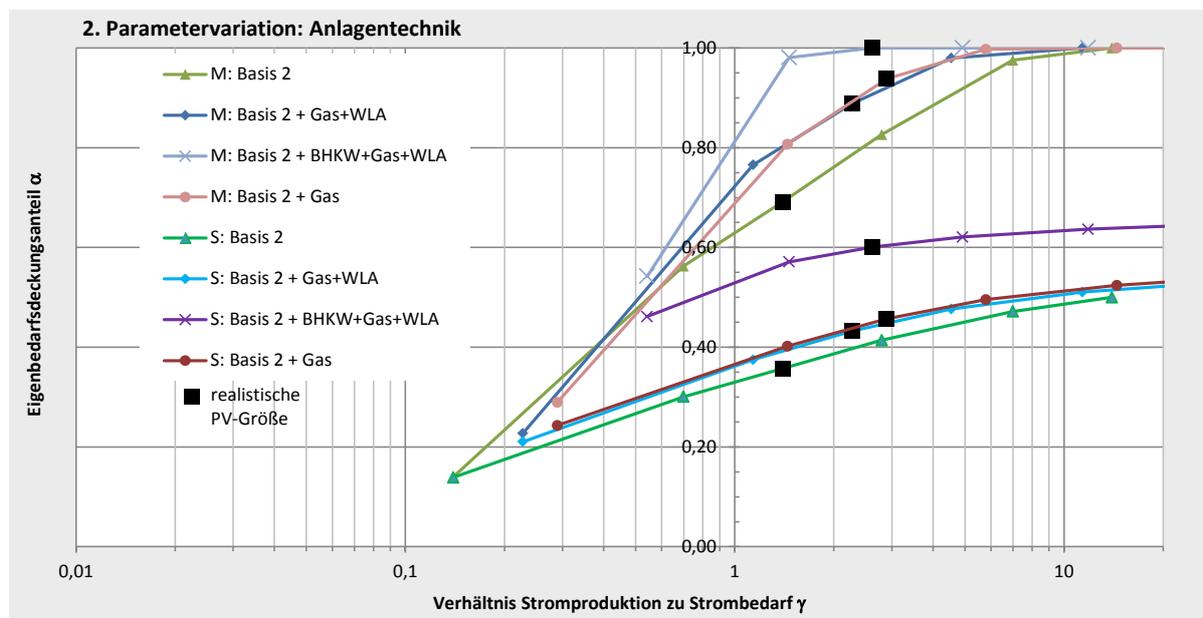


Abbildung 27: Parametervariation Anlagentechnik⁸⁶

Wie in Abbildung 27 zu sehen, hat die Anlagentechnik einen großen Einfluss auf die Höhe des Strombedarfs (siehe 3.1.2). Die erreichbaren Deckungsanteile der Wärmepumpe, also der Anlagentechnik mit hohem Strombedarf (Strom für Wärmeerzeugung H+WW und Hilfsstrom H+WW+WLA), liegen bei gleichem Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf unter denen der Anlagen mit niedrigem Strombedarf (nur Hilfsstrom H+WW(+WLA)). Zu beachten ist aber, dass die anderen Anlagen neben dem Strombedarf noch fossile oder biogene Brennstoffe benötigen um ihren gesamten Energiebedarf zu decken.

⁸⁶ Abbildung selbst erstellt (02.08.14).

Einen gegenüber den bisherigen Betrachtungen besonderen Fall stellt die Variante mit BHKW (wärmegeführt) dar. Auch hier wird die PV-Anlagengröße variiert, jedoch gibt es zusätzlich noch einen konstanten Beitrag zur Stromproduktion seitens des BHKWs. Sowohl auf Monats- als auch auf Stundenebene erreicht die Variante mit BHKW die größten Deckungsanteile. Grund dafür ist, dass das BHKW in den Wintermonaten die Stromproduktion der PV ergänzt und damit über das Jahr gesehen eine gleichmäßigere Stromproduktion entsteht. Der saisonale Unterschied von PV Produktion und Strombedarf wird durch das BHKW also stärker ausgeglichen. In Abbildung 28 ist dies am Beispiel der monatlichen Verrechnung veranschaulicht. Das BHKW stellt also eine gute Ergänzung zur PV Anlage dar. Der Unterschied der Eigenbedarfsdeckung des BHKW von der monatlichen auf die stündliche Betrachtung ist aber, wie bei den anderen Anlagentechniken auch, sehr hoch. Diese Ergebnisse auf Stundenebene hängen natürlich stark davon ab, inwiefern durch Steuerung der BHKW-Laufzeit und Einsatz eines Pufferspeichers (hier nicht berücksichtigt) das Profil der Stromerzeugung auf den Strombedarf abgestimmt werden kann.

Bei diesen Betrachtungen ist grundsätzlich zu beachten, dass bei hohem Wärmeschutz ein niedriger Heizwärmebedarf besteht und damit auch weniger Strom vom BHKW produziert wird als bei hohem Heizwärmebedarf. Der Eigenbedarfsdeckungsanteil des BHKWs lässt sich also – anders als bei der PV-Anlage – auf Grund der Kopplung der Stromproduktion an die Wärmeerzeugung nicht beliebig weit erhöhen. Die Tatsache, dass aus schlechterem Wärmeschutz eine größere Stromerzeugung des BHKWs, und somit ggf. ein höherer Eigenbedarfsdeckungsanteil resultiert muss jedoch vor dem Hintergrund anderer Bewertungsmethoden (z. B. Primärenergie und Treibhausgasemissionen) kritisch gesehen werden. Die KWK ist jedoch eine gute Methode den bestehenden Wärmebedarf bei Einsatz von Brennstoffen möglichst effizient zu decken.

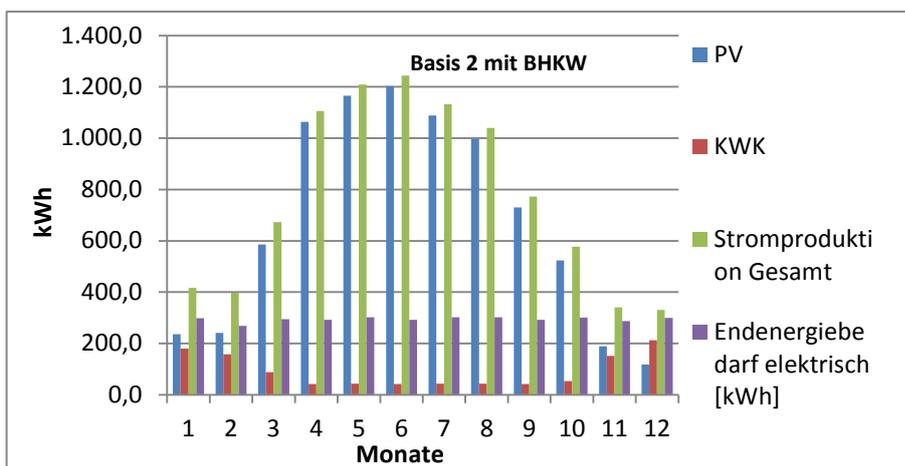


Abbildung 28: Basis 2 mit BHKW⁸⁷

⁸⁷ Abbildung selbst erstellt (05.08.14).

4.2.3 Einfluss des Gebäudetyps

Basis 2 + Gebäudetyp variiert

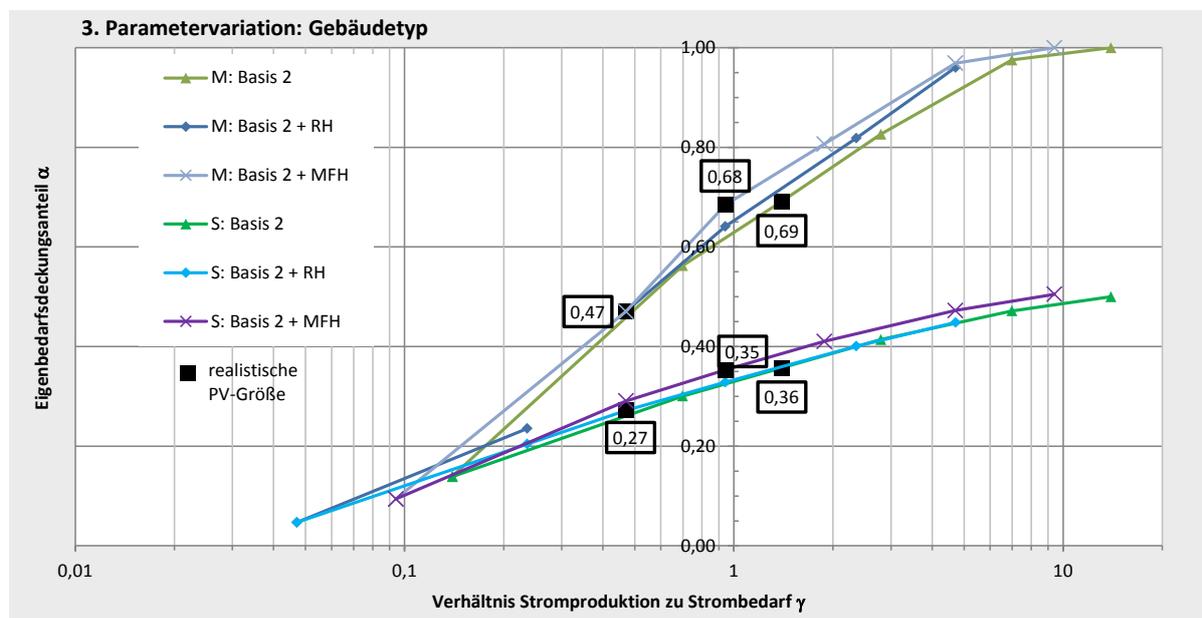


Abbildung 29: Parametervariation Gebäudetyp⁸⁸

Der Gebäudetyp hat wie in Abbildung 29 zu sehen ist, keine großen Auswirkungen auf die Ergebniskurven. Dies ist die logische Schlussfolgerung dessen, dass in der Grafik das Verhältnis Stromproduktion zu -bedarf dargestellt wird und dabei der gleiche Wärmeschutzstandard und die gleiche Anlagentechnik betrachtet wird.

Anhand der Datenpunkte, die die realistische PV-Anlagengröße (Faktor 1) darstellen (mit Rahmen dargestellt), ist der Unterschied der Gebäude aber deutlich zu sehen. Das Einfamilienhaus erreicht hier bei realistischer Anlagengröße als einziges ein $\gamma > 1$ und kann somit seinen jährlichen Strombedarf komplett selbst erzeugen, bzw. einen Energieüberschuss erreichen. Grund ist, dass beim Einfamilienhaus die für die solare Energieerzeugung zur Verfügung stehenden Dachfläche im Verhältnis zur Wohnfläche und somit zum Strombedarf des Gebäudes am größten ist. Dieser Zusammenhang führt dazu, dass mit steigender Gebäudegröße, bzw. kleinerer Dachfläche im Verhältnis zur Wohnfläche, es für die Gebäude schwieriger wird einen Energieüberschuss, bzw. ein $\gamma > 1$ zu erreichen. Dies wird beim Mehrfamilienhaus und Reihenhaus ersichtlich. Das Mehrfamilienhaus schneidet bei der Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit besser ab, als das Reihenhaus. Grund dafür ist, dass bei dem MFH die PV-Anlage auf einer großen Garagendachfläche erweitert werden konnte. Da bei dem Reihenhaus die eine Dachseite nach Norden ausgerichtet ist und aufgrund des schmalen Grundstücks keine Garage als Ausweichfläche vorhanden ist, fällt die realistische PV-Anlagengröße bei diesem Gebäude sehr klein aus.

⁸⁸ Abbildung selbst erstellt (02.08.14).

Diese äußeren Gegebenheiten der in dieser Arbeit analysierten Gebäude bilden die Realität relativ gut ab. Reihenhäuser sind in der Regel auf kleinsten Grundstücken eng aneinander gebaut. Zu beachten ist aber, dass durch eine geeignete Dachflächenausrichtung dieser Tatsache entgegengewirkt werden kann und, dass nicht alle Mehrfamilienhäuser große Garagendachflächen als Erweiterung der PV-Anlage besitzen.

5 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Eigenbedarfsdeckung

Bei energieeffizienten Gebäuden, wie der in 4.1 untersuchten Basisvariante, liefert die PV-Anlage in der Jahressumme so viel Strom, dass bei dem Einsatz einer Elektro-Wärmepumpe der Jahresbedarf für Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom komplett gedeckt wird.

Bei der Verrechnung in kleineren Schritten ist eine Deckung von 100 % nicht mehr zu erreichen. Bei monatlicher Schrittweite sind knapp 70% Eigenbedarfsdeckung möglich, bei täglicher etwas über 60% und bei stündlicher Betrachtung nur noch ca. 35% (siehe Abbildung 30).

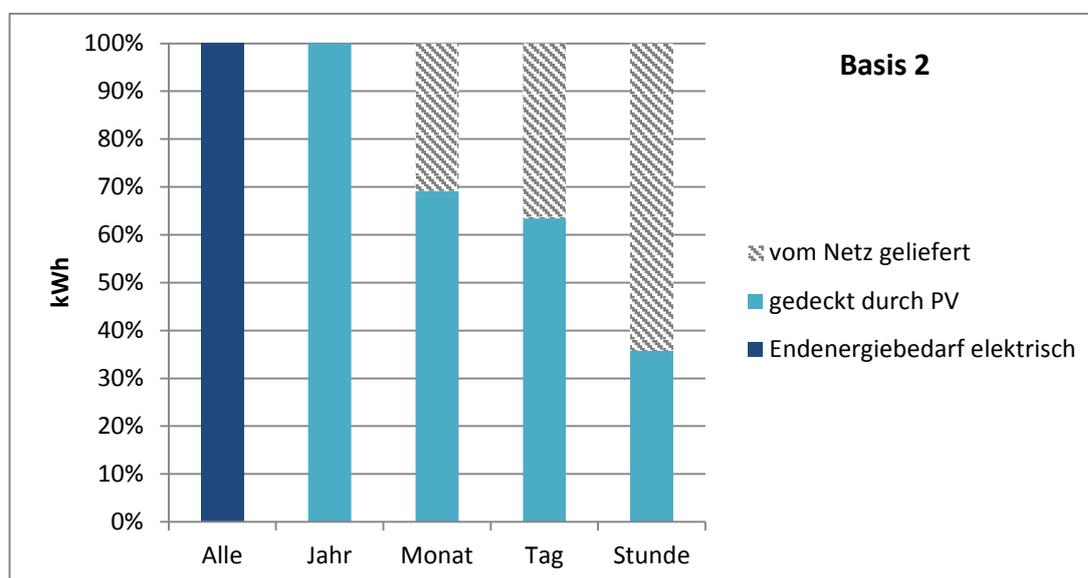


Abbildung 30: Eigenbedarfsdeckung Basis 2 (EFH mit Haushaltsstrom) für unterschiedliche Verrechnungsschrittweiten⁸⁹

Um bei monatlicher Betrachtung annähernd 100% Eigenbedarfsdeckung zu erreichen, wäre eine 10-fach größere PV-Anlage notwendig (Abbildung 25). Bei Verrechnung auf Stundenebene würde diese Vergrößerung der Anlage nicht mehr als 50% Eigenbedarfsdeckung erzielen. Grund dafür ist, dass neben saisonalen Unterschieden auf der Stundenebene auch die Diskrepanz der Produktion und des Bedarfs zwischen Tag und Nacht Berücksichtigung findet.

⁸⁹ Abbildung selbst erstellt (04.08.14).

In dieser Arbeit wurden typischerweise zu erwartende Tagesgänge des Strombedarfs und der Stromproduktion berücksichtigt. Eine Möglichkeit den Eigenbedarfsdeckungsanteil zu erhöhen besteht darin, die Tagesgänge gezielt zu verändern. Das bedeutet zum Beispiel den Strombedarf in Zeiten hoher Stromproduktion zu verlagern. Zum einen kann dies durch verändertes Nutzerverhalten umgesetzt werden. Von besonders hoher Relevanz für die Zukunft wird aber die Schaffung von sogenannten „Smart Grids“ sein. Das bedeutet, dass Stromverbraucher und Erzeuger mit einander verknüpft werden. Intelligente Stromzähler, welche durch das „Smart Grid“ gesteuert werden, erfassen die Zeiten hoher Stromproduktion und der Stromverbrauch wird dann möglichst in diesen Zeitraum verlagert. Das kann zum Beispiel bedeuten, dass Haushaltsgeräte wie Spülmaschine und Waschmaschine automatisch mittags bei hoher PV Stromproduktion angeschaltet werden. Oder, dass die Wärmepumpe mittags neben dem aktuellen Heizbedarf einen Pufferspeicher befüllt, damit abends und nachts die Wärme abgerufen werden kann und die Wärmepumpe aus bleiben kann.

Eine weitere Möglichkeit ist die Speicherung des Stroms für Zeiten mit hohem Strombedarf. Diese elektrischen Speicher am Haus können dann zusätzlich, durch das „Smart Grid“ gesteuert, die Eigenbedarfsdeckung erhöhen. Darauf wird in Kapitel 5.4 noch weiter eingegangen.

5.2 Diskussion des methodischen Vorgehens

Bewertung der Erzeugung von Monatswerten

Die Monatswerte für Stromproduktion durch PV und Endenergiebedarf elektrisch für Heizung und Warmwasser wurden nach EnEV und DIN V 18599 von ZUB Helena übernommen und gelten damit als gegeben. Die fehlenden Monatswerte, wie die BHKW Stromproduktion und Hilfsenergie für Heizung und Warmwasser und der Haushaltsstrom sind mittels realistischer Annahmen bestimmt worden.

Bewertung der Erzeugung der Stundenwerte

Für die Stundenwerte wurden im Rahmen dieser Arbeit eigene Konzepte zur exemplarischen Ermittlung von Profilen entwickelt. Die Verrechnungen auf Stundenebene könnten bei Verwendung anderer Profile leicht variieren. Denkbar wäre es zum Beispiel die Profile an die verschiedenen Gebäudetypen Einfamilienhaus, Reihenhaus und Mehrfamilienhaus anzupassen. Dies könnte sich für das Mehrfamilienhaus bei der Verrechnung positiv auswirken, da die Profile des Strombedarfs insgesamt ausgeglichener ausfallen würden und der Eigenbedarfsdeckungsanteil dadurch höher ausfallen könnte. Außerdem könnte ein intelligent gesteuerter Pufferspeicher, wie in 5.1 angesprochen, in die Berechnungen für das Profil des Heizbedarfs implementiert werden.

Die Erstellung von realistischen Zeitprofilen des Energiebedarfs erzeugte im Rahmen der Arbeit einen erheblichen Aufwand. Eine grundsätzliche Frage dabei ist je-

doch, wie stark die Ergebnisse tatsächlich von der Variation der Profile abhängig sind. Dies wäre eine interessante Fragestellung für zukünftige Untersuchungen.

Bewertung der Parametervariation

Bei der Parametervariation wurde bewusst darauf verzichtet jede denkbare Kombination der Parameter aufzuführen. Stattdessen wurde, ausgehend von der Basisvariante jeweils nur ein Parameter verändert, um seinen Einfluss isoliert zu betrachten.

Zur Vollständigkeit sind im Anhang alle Datensätze aufgeführt, sodass jede eventuell benötigte Variante auf analoge Weise dargestellt werden kann.

Bewertung der Tabellenwerte

Die Tabellenwerte wurden über lineare Interpolation der Ergebnisse berechnet. Eine weitere Aufgabe für die Zukunft könnte es sein, aus den Tabellenwerten einen funktionalen Zusammenhang abzuleiten. Die Umsetzung in Berechnungsverfahren wäre mit Funktionen einfacher als die lineare Interpolation.

5.3 Anwendungsfelder

Anwendung der Tabellenwerte

Die im Rahmen der Arbeit erstellten Tabellenwerte machen es möglich, die Zeitschrittweite der Verrechnung von der Zeitschrittweite der Gebäude-Energiebilanz-Berechnung abzukoppeln. Das bedeutet bei der Erstellung einer Monatsbilanz nach EnEV wäre trotzdem die Verrechnung auf Stundenebene möglich. Aber auch eine einfache und transparente Jahresbilanz für Gebäude und Anlagentechnik, wie es das TABULA-Verfahren darstellt, ist damit ohne großen Aufwand mit der monatlichen bis stündlichen Verrechnung kombinierbar.

Anwendung für Verbraucher

Die Erlöse für eingespeisten Strom sinken immer weiter. Die Vergütung liegt im August 2014 bei 12,75 ct bei Dachanlagen bis 10 kWp⁹⁰. Gleichzeitig ist der Strompreis für den Verbraucher in den letzten 25 Jahren um 34%⁹¹ gestiegen und lag Ende 2013 bei 29,21 ct⁹². Dadurch wird die Fragestellung immer relevanter, wie viel des

⁹⁰ Vgl.

http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1422/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/ArchivDatenMeldgn/ArchivDatenMeldgn_node.html (Zugriff am 06.08.14).

⁹¹

[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf) (Zugriff am 06.08.14).

⁹²

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungP/DF_5619001.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 10.08.14).

eigenen Stromverbrauchs durch eine PV-Anlage gedeckt werden kann. Die monatliche Berechnung der Eigenbedarfsdeckung auf Basis der EnEV Bilanzierung, welche derzeit das Standardverfahren ist, führt zu überhöhten Angaben zur Eigenbedarfsdeckung. Der tatsächlich zu erreichende Eigenbedarfsdeckungsanteil hängt von der tatsächlichen Schrittweite der Erfassung durch die Stromzähler ab. Auch die stündliche Verrechnung ist nur eine Annäherung an die tatsächliche Verrechnungsschrittweite der Energieversorgungsunternehmen (EVU), aber wie diese Studie gezeigt hat, reduziert sich die Eigenbedarfsdeckung dadurch deutlich gegenüber der monatlichen Verrechnung. Das heißt auf Basis der EnEV-Bilanzierung wird der Eigenbedarfsdeckungsanteil zu optimistisch dargestellt, da der Ausgleich zwischen Erzeugung (tagsüber) und Bedarf (nachts) nicht berücksichtigt wird.

Beim weiteren Ausbau erneuerbarer Energien werden Stromversorger in Zukunft vermutlich bei Preisbildung und Messung immer stärker berücksichtigen, wann der Strom aus dem Netz bezogen wird und wann er eingespeist wird.

5.4 Weiterführende Betrachtung

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Folgende Faktoren sind für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Eigenbedarfsdeckung relevant:

Netzparität

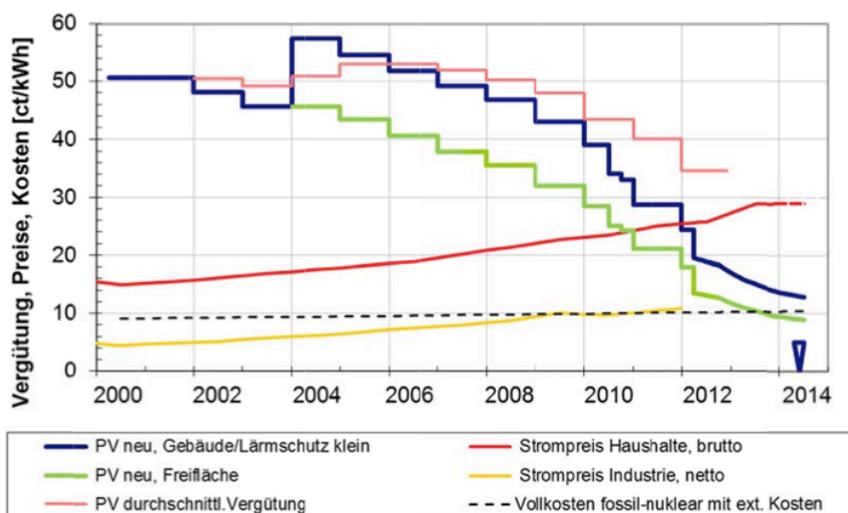


Abbildung 31: Entwicklung der Strompreise und der Vergütungen für eingespeisten PV-Strom / Netzparität⁹³

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Eigenbedarfsdeckung hängt stark mit dem Begriff der Netzparität zusammen. Die Netzparität ist der Zeitpunkt, zu dem der Strombezugspreis genauso hoch ist, wie die Einspeisevergütung für den produzier-

⁹³ Abbildung entnommen aus Wirth (2014), S.9.

ten Strom. Ab diesem Zeitpunkt lohnt sich beispielsweise für den Besitzer einer PV-Anlage die Eigennutzung des produzierten Stroms mehr, als die Einspeisung in das Netz. Je nachdem um welche Anlage zur Erzeugung von Strom aus regenerativen Energien oder KWK es sich handelt, wie groß diese dimensioniert ist und ob es sich um private Haushalte oder Unternehmen handelt, variiert auch der Eintritt der Netzparität. Für private Haushalte mit der Nutzung einer PV Anlage wurde die Netzparität unter dem Gesichtspunkt des Vergleichs von Strompreis, welcher aktuell bei 29,21 ct⁹⁴ liegt und Einspeisevergütung, welche bei erbauten Anlagen ab August bei 12,75 ct⁹⁵ liegt, bereits erreicht (siehe Abbildung 31).

Zu beachten sind bei der Erzeugung von Strom aber auch die Stromgestehungskosten. Diese bezeichnen „das Verhältnis aus Gesamtkosten (€) und elektrischer Energieproduktion (kWh), beides bezogen auf seine wirtschaftliche Nutzungsdauer.“⁹⁶ Bei der PV setzen sich diese Gesamtkosten hauptsächlich aus den Anschaffungskosten und zum restlichen Teil auch aus Finanzierungsbedingungen und Betriebskosten wie der Wartung zusammen.⁹⁷ Für den Fall, dass der Strombezugspreis höher ist als die Einspeisevergütung, wird es ab dem Zeitpunkt, zu dem die Stromgestehungskosten kleiner als der Strombezugspreis und größer als die Einspeisevergütung sind wirtschaftlich den selbst erzeugten Strom zur Eigenbedarfsdeckung zu nutzen.

Bei der Betrachtung der Rentabilität der Eigennutzung des produzierten Stroms sind die Netzparität und die Entwicklung der Stromgestehungskosten also wichtige Aspekte.

EEG

Ein weiterer Aspekt bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist die mit der Erneuerung des EEG ab 1. Aug 2014 eingeführte EEG Umlage für den Eigenverbrauch von selbst produziertem Strom. Ein Beitrag von 30% der Umlage ist nach §61 EEG 2014 Absatz 1 Nr.1 für den Strom für Eigenversorgung an den Übertragungsnetzbetreiber abzugeben. Befreit sind aber nach Absatz 2 Nr. 4 Anlagen Reg Energien oder KWK mit höchstens 10 KW Leistung und höchstens 10 MWh selbst verbrauchten Strom im Jahr. In die Bewertung der Wirtschaftlichkeit muss diese Tatsache also auch mit einfließen.

⁹⁴

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungP DF_5619001.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 10.08.14).

⁹⁵ Vgl.

http://www.bundesnetzagentur.de/clin_1422/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/ArchivDatenMeldgn/ArchivDatenMeldgn_node.html (Zugriff am 06.08.14).

⁹⁶ Wirth (2014), S.7.

⁹⁷ Wirth (2014), S.7.

Speicher

Im Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeit der Eigenbedarfsdeckung stellt sich natürlich auch die Frage, inwiefern elektrische Energiespeicher den Eigenbedarfsdeckungsanteil steigern können. Laut einer Studie des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung können kleine bis mittelgroße Speicher von 2,5 bis 7,5 kWh die Eigenbedarfsdeckung erheblich steigern (40-96 %). Trotzdem ist der Studie zufolge der Eigenverbrauch ohne Speicher wirtschaftlicher.⁹⁸ Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Preise für Speichertechnologien in den nächsten Jahren sinken und diese dadurch wirtschaftlich werden.

Ohne einen Speicher in die Berechnungen dieser Arbeit mit einbeziehen zu wollen, lassen sich die Effekte eines Speichers, welcher für den Tag-Nacht Ausgleich ausgelegt wird, anhand der Ergebnisgrafiken gut beschreiben. Ein kleiner Speicher würde den am Mittag entstehenden Überschuss der PV einspeichern und damit den Strombedarf am Abend, in der Nacht und optimalerweise am nächsten Morgen decken. Die Lastspitzen des zur Verfügung stehenden Stroms würden dadurch in den Mittagsstunden reduziert und der produzierte Strom könnte auf den restlichen Tag verteilt werden und einen höheren Beitrag zur Eigenbedarfsdeckung leisten.

Die Kurve der Eigenbedarfsdeckungsanteile der stündlichen Verrechnung würde sich, wie in Abbildung 32 dargestellt, in Richtung der Kurve der täglichen Verrechnung verschieben.

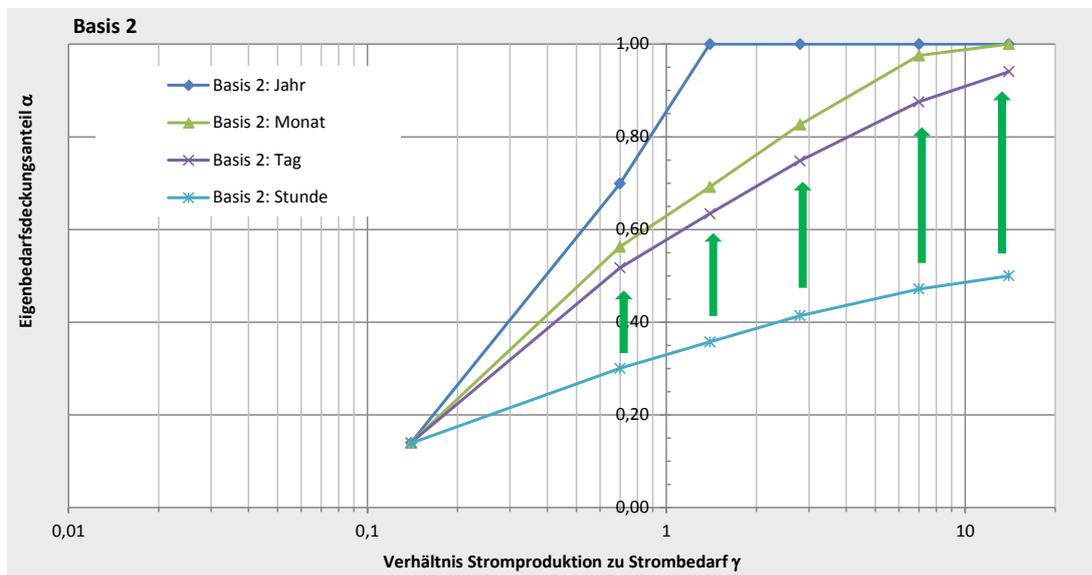


Abbildung 32: Auswirkung des Einsatzes eines elektrischen Energiespeichers für den Tag-Nacht Ausgleich⁹⁹ auf den stündlichen Eigenbedarfsdeckungsanteil

⁹⁸ Bost et al. (2012), S.10.

⁹⁹ Abbildung selbst erstellt (09.08.14).

Um die Steigerung der Eigenbedarfsdeckung mit einem Speicher für den Tag-Nacht Ausgleich exakt zu betrachten müssen die Auslegungsgröße und die Speicherverluste mit berücksichtigt werden.

Gegenstand weiterer auf dieser Arbeit aufbauender Untersuchungen könnte es sein, einen solchen Speicher in das EBD Tool zu integrieren und die Auswirkungen auf den Eigenbedarfsdeckungsanteil zu analysieren.

Zusammenfassend

Generell stellt das Thema Wirtschaftlichkeit der Eigenbedarfsdeckung eine für die Zukunft sehr interessante Fragestellung dar, welche in aufbauenden Analysen betrachtet werden könnte. Dieses Thema wird dabei von sehr vielen äußeren Einflüssen bestimmt, unter anderem, wie oben schon erwähnt, von der Höhe der EEG-Umlage, der Einspeisevergütung und den Stromgestehungskosten von regenerativen Energien und KWK und vielem mehr. Grundlage für die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit ist aber, wie im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, welcher Anteil an Eigenbedarfsdeckung überhaupt erreicht werden kann.

6 Fazit

Gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung sollen die CO₂-Emissionen im Gebäudesektor bis 2050 um 80% reduziert werden. Um dieses Ziel zu erreichen muss der Energiebedarf von Gebäuden drastisch reduziert werden und der verbleibende Restbedarf durch einen möglichst hohen Anteil an erneuerbaren Energien gedeckt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welcher Anteil des Gebäudeenergiebedarfs direkt durch im oder am Gebäude erzeugten Strom gedeckt werden kann.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde an drei exemplarischen Wohngebäuden ermittelt, welcher Anteil des Strombedarfs der Gebäude von Anlagen zur erneuerbaren Energieerzeugung (Photovoltaik) und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen gedeckt werden kann. Dieser Anteil wird im weiteren Eigenbedarfsdeckungsanteil genannt.

Um die Ermittlung des Eigenbedarfsdeckungsanteils für ein weites, relevantes Spektrum von Einsatzfällen darzustellen, wurde ein umfangreiches Tabellenwerk erstellt, aus dem sich der Eigenbedarfsdeckungsanteil ($\alpha_{el,prod}$) als Funktion des Verhältnisses von Stromproduktion zu Strombedarf (γ_{el}) abschätzen lässt. Folgende Parameter können bei der Auswahl der richtigen „Ergebniskurve“ berücksichtigt werden:

1. Der Wärmeschutzstandard (von Altbau bis Passivhaus)
2. Die Anlagentechnik (Wärmepumpe, BHKW, Brennwertkessel, Wohnungs-lüftungsanlage)
3. Der Gebäudetyp (Einfamilienhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus)
4. Der Verrechnungsraum (mit/ohne Haushaltsstrom)
5. Die Verrechnungsschrittweite (Jahr, Monat, Tag, Stunde)

Durch die Berücksichtigung des Haushaltsstrombedarfs wird die Bilanzierung nach EnEV 2014 um eine sinnvolle Komponente ergänzt, um zu einer möglichst realitäts-nahen Einschätzung des Eigenbedarfsdeckungsanteils zu gelangen.

Um einen relevanten Gültigkeitsbereich (Input-Bandbreite) für das Verhältnis von Stromproduktion zu Strombedarf abzudecken, wurde die im Hinblick auf das Gebäude als sinnvoll ermittelte PV-Anlagengröße mittels Faktoren vergrößert und verkleinert. Der Eigenbedarfsdeckungsanteil wurde dadurch jeweils für 6 unterschiedlich große PV-Anlagengrößen berechnet. Zwischen diesen Werten wurde linear interpoliert.

Wie in dieser Arbeit gezeigt wird, spielt die Verrechnungsschrittweite bei der Bestimmung der Eigenbedarfsdeckung eine entscheidende Rolle. Wie zu erwarten war, sinkt der berechnete Eigenbedarfsdeckungsanteil bei zunehmender Reduktion der Verrechnungsschrittweite. Wie in Kapitel 4.1 bei der Berechnung der Basisvariante dargestellt, führt die Reduktion der Schrittweite von Monat auf Tag noch nicht zu einer entscheidenden Änderung des Eigenbedarfsdeckungsanteils. Erst bei der

Ausdehnung auf die stündliche Verrechnung ergeben sich signifikante Unterschiede. Im Fall der Basisvariante (Passivhausstandard, PV-Anlage, Wärmepumpe, Wohnungslüftungsanlage, ohne Haushaltsstrom) mit einem Eingangswert von $\gamma_{el} = 1,0$ ergibt sich bei der stündlichen Verrechnung eine Reduktion des Eigenbedarfsdeckungsanteils um 50% im Vergleich zur monatlichen Berechnung. Diese deutliche Reduktion konnte auch für andere, exemplarisch ausgewählte Konstellationen bestätigt werden.

Die EnEV 2014, welche in Deutschland rechtliche Grundlage für die Ermittlung des Energiebedarfs von Wohngebäuden ist, setzt eine Energiebilanzierung auf monatlicher Ebene um. Wie die vorliegende Arbeit gezeigt hat, wird die Eigenbedarfsdeckung nach Bewertung der EnEV systematisch überschätzt.

Weiterhin ergaben die exemplarischen Berechnungen, dass bei großen PV-Anlagen und daher größerem γ_{el} (Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf) der Wechsel der monatlichen auf die stündliche Verrechnung sehr viel stärker ins Gewicht fällt, als bei niedrigem γ_{el} . Für beispielsweise $\gamma_{el} = 0,1$ liegt der Eigenbedarfsdeckungsanteil auf Monats- und auf Stundenebene bei 10%, für $\gamma_{el} = 5$ liegt er auf Monats-ebene bei 98% und auf Stundenebene nur bei 47%. Das könnte dazu führen, dass von der Bilanzierung nach EnEV, bei einseitiger Ausrichtung auf den Eigenbedarfsdeckungsanteil, Anreize für eine Überdimensionierung der PV-Anlagen ausgehen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die gemäß EnEV 2014 in diesen Fall ermittelten Eigenbedarfsanteile tatsächlich erreicht werden können.

Ausgehend von der Basisvariante 2 (Passivhaus, PV-Anlage, Wärmepumpe, Wohnungslüftungsanlage, mit Haushaltsstrom) inkl. Haushaltsstrom wurde dann der Einfluss der anderen Parameter auf den Eigenbedarfsdeckungsanteil anhand der monatlichen und der stündlichen Verrechnungsschrittweite systematisch untersucht. Zusammenfassend ergaben sich dabei folgende, wesentliche Erkenntnisse:

In Bezug auf das Wärmeschutzniveau führt die stündliche Verrechnungsschrittweite zu einer realistischeren Einschätzung der Steigerung des EBD durch eine Verbesserung des Wärmeschutzniveaus. Mit steigendem Wärmeschutzniveau reicht eine kleinere PV-Anlage aus um den gleichen Eigenbedarfsdeckungsanteil zu erreichen.

Beim Vergleich der verschiedenen Anlagentechniken der Wärmeerzeugung fällt auf, dass die Anlagen mit lediglich Hilfsstrombedarf einen höheren Eigenbedarfsdeckungsanteil bei gleichem Verhältnis γ_{el} aufweisen, als beispielsweise die Wärmepumpe, welche neben Hilfsstrom auch bedarfsabhängigen Strom zur Wärmeerzeugung benötigt. Das BHKW erzielt aufgrund der wärmegeführten Betriebsweise die höchsten Eigenbedarfsdeckungsanteile.

Bei gleichem Wärmeschutzstandard und gleicher Anlagentechnik spielt der Gebäudetyp keine große Rolle bei der Ermittlung der Höhe des Eigenbedarfsdeckungsanteils in Abhängigkeit zum Verhältnis γ_{el} . Entscheidend für den Unterschied ist aber die Höhe des Verhältnis γ_{el} , da die realistische Größe der PV Anlage im Vergleich zum Strombedarf bei einem Einfamilienhaus höher ausfällt als bei Reihenhäusern oder Mehrfamilienhäusern.

In Bezug auf den Verrechnungsraum lässt sich feststellen, dass die Einbeziehung des Haushaltsstroms in die Verrechnung, bei gleichem Verhältnis γ_{el} , einen höheren Eigenbedarfsdeckungsanteil zur Folge hat.

Die im Rahmen der Bachelor-Thesis durch das selbst entwickelte EBD Tool erzeugte große Datenmenge konnte nicht vollständig analysiert werden. Vorstellbar wäre noch die vollständige Analyse des Einflusses der Verrechnungsschrittweite über alle Modellvarianten hinweg.

Außerdem wirft die Arbeit die Frage auf, wie sich eine weitere Reduktion der Verrechnungsschrittweite auf Minuten oder Sekunden auf die ermittelte Eigenbedarfsdeckung auswirkt.

Interessant ist sicherlich auch die weiterführende Frage, wie sich die Variation der Verrechnungsschrittweite von der Betrachtung einzelner Gebäude auf die Bewertung des gesamten Gebäudebestands der Bundesrepublik im Hinblick auf den erzielbaren Eigenbedarfsdeckungsanteil übertragen lässt.

Auf jeden Fall wurde mit der Arbeit ein umfassendes Tabellenwerk geschaffen, das zur Einschätzung der Eigenbedarfsdeckung für wissenschaftliche Zwecke im Rahmen von Modellfall-Betrachtungen und Szenarien-Analysen genutzt werden kann.

Glossar

Blockheizkraftwerk (BHKW)

Anlage zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme. Funktioniert über das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung. Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlage) gibt es in großer Form, wie sie als mittelgroße Kraftwerke durch den Energieversorger betrieben werden. Daneben gibt es sog. Mini- oder Micro-BHKWs, die für die Versorgung einzelner Gebäude ausgelegt sind.

DIN V 18599

Die Anfang 2007 veröffentlichte Normenreihe befasst sich mit der Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung von Gebäuden. Die neue Norm bildet die Grundlage für den Energieausweis und dient als Berechnungsmethode für die Energieeinsparverordnung (EnEV).

Einspeisevergütung

Die Einspeisevergütung ist ein Förderinstrument, welches im Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) festgeschrieben ist. Für das Einspeisen des Stromertrages in das allgemeine Stromnetz erhält der Betreiber einer Solaranlage diese Einspeisevergütung, die für einen bestimmten Zeitraum festgelegt wird.

Endenergie

Energieinhalt aller primären und sekundären Energieträger (z. B. Koks, Briketts, Strom, Fernwärme, Heizöl), die der Verbraucher bezieht. Im Gegensatz zur Primärenergie ist die Endenergie um den nichtenergetischen Verbrauch und um die Umwandlungs- und Übertragungsverluste verringert.

Energiebedarf [kWh/a]

Menge an Energie, die ein Gebäude unter festgelegten Bedingungen (Klima, Raumtemperatur, Lüftung, Warmwasserverbrauch) in einem bestimmten Zeitraum benötigt.

Energieverbrauch [kWh/a]

Im Unterschied zum Energiebedarf ist der Energieverbrauch eine gemessene Menge Energie, die in einem bestimmten Zeitraum unter Berücksichtigung von Wetter, Nutzungsverhalten oder Anlagenbetrieb verbraucht wurde. Physikalisch gesehen kann Energie in einem geschlossenen System nicht verbraucht, sondern nur umgewandelt werden.

EnEV 2014

Energieeinsparverordnung, die die rechtliche Grundlage für die Energiebilanzierung in Deutschland darstellt. Die Novellierung, EnEV 2014, ist ab 1. Mai 2014 in Kraft getreten. Enthalten sind u. A. die Regelung für Energieausweise für Gebäude (Bestand und Neubau) sowie deren energetische Mindestanforderungen.

Heizwärmebedarf [kWh/a, kWh/m²a]

Nutzenergiemenge, die rechnerisch ermittelt wird. Sie wird vom Heizkörper, Fußbodenheizung oder Lüftungsanlage an den Raum abgegeben.

IWU

Das Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU) ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung der Gesellschafter Land Hessen und Stadt Darmstadt. Das IWU ist sowohl im Bereich der Grundlagenforschung, als auch in der anwendungsorientierten Forschung engagiert und legt großen Wert auf interdisziplinäre Arbeit.

KfW 70 Haus

Ein KfW-70-Haus hat einen Jahresprimärenergiebedarf von nur 70 % eines vergleichbaren Neubaus nach der EnEV. Die KfW-Bank fördert den Kauf oder Bau von sogenannten Effizienzhäusern mit zinsgünstigen Krediten und Tilgungszuschüssen. Um den Standard eines KfW 70-Hauses zu erreichen, sind besondere Anforderungen an Außenwand- und Fensterdämmung sowie Heizung erforderlich.

Lüftungsanlage

Lüftungsanlagen sind Anlagen, die der kontrollierten Belüftung von Gebäuden dienen, d.h. die Belüftung hängt weder von einem sinnvollen Lüftungsverhalten der Nutzer ab, noch von den Witterungsbedingungen (Außentemperatur und Windverhältnisse). Man spricht auch von mechanischer Lüftung, weil die Luft mit mechanischen Mitteln (Ventilatoren) bewegt wird anstatt durch Konvektion oder Wind wie beim Fensterlüften.

Lüftungswärmeverlust [W/K]

Lüftungswärmeverluste entstehen, wenn warme Raumluft gegen kältere Außenluft ausgetauscht wird. Durch undichte Bauteile können unkontrollierte Lüftungswärmeverluste den Heizwärmebedarf deutlich erhöhen. Eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung reduziert Lüftungswärmeverluste.

Nullenergiehaus

Gebäude, deren rechnerische oder messtechnische Jahresenergiebilanz null ergibt. Durch regenerative Energien oder KWK-Anlagen am Gebäude wird Energie selbst erzeugt.

Nutzenergie

Als Nutzenergie bezeichnet man meistens Energie wie sie vom Endbenutzer direkt benötigt wird. Durch Übertragungs- und Umwandlungsverluste ist die Nutzenergie geringer als die am Übergabepunkt gemessene Endenergie. Formen der Nutzenergie sind Wärme zur Raumheizung, Licht zur Beleuchtung oder mechanische Antriebsenergie.

Passivhaus

Das Passivhaus ist ein Gebäudestandard, der energieeffizient, komfortabel, wirtschaftlich und umweltfreundlich zugleich ist. Es ist ein Baukonzept, dessen Anforderungen nicht von öffentlicher Seite, sondern von einem Institut (Passivhaus-Institut, Darmstadt) formuliert wurden.

Photovoltaik

Direkte Umwandlung von solarer Strahlungsenergie in elektrische Energie. Die Umwandlung erfolgt in Solarzellen, die zu Solarmodulen (PV-Modulen) verbunden werden.

Primärenergie

Energie in Formen, die in der Natur direkt vorkommen, wie Braunkohle, Erdöl, Erdgas sowie erneuerbare Energiequellen. Die Primärenergie wird durch Kohleabbau, Raffinerien, Kraftwerke in Sekundärenergie umgewandelt (Koks, Briketts, Strom, Fernwärme, Heizöl). Die Energie am Ort des Verbrauchs ist die Endenergie, die wiederum in Nutzenergie transformiert wird.

Pufferspeicher

Unter einem Pufferspeicher versteht man in einer Heizungsanlage einen Wärmespeicher, der mit Wasser befüllt ist. Er dient dazu, Differenzen zwischen der erzeugten und der verbrauchten Wärmemenge auszugleichen und Leistungsschwankungen zu glätten.

Solare Gewinne

Als Solare Gewinne bezeichnet man Wärmemengen, die durch die Einstrahlung von Solarenergie auf Gebäudeteile absorbiert werden. Sie tragen zur Erwärmung des Gebäudes und der Raumluft bei und reduzieren so den Heizwärmebedarf.

Smart Grid

Sogenannte intelligente Stromnetze, die die kommunikative Vernetzung von Verbrauchern und Erzeugern herstellen, um über eine dezentrale Steuerung die Elektrizitätsversorgung und den -verbrauch zeitlich zu optimieren.

TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment)

Entwicklung von Gebäudetypologien zur energetischen Bewertung des Wohngebäudebestands in 13 europäischen Ländern.

Transmissionswärmeverluste

Transmissionswärmeverluste entstehen infolge von Wärmeverlusten durch Umfassungsflächen beheizter Räume und aufgrund von Wärmebrücken.

U-Wert [W/m²K]

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ist ein Maß für den Wärmedurchgang durch ein Bauteil. Er gibt an, wie viel Energie pro 1 Kelvin über eine Fläche von einem Quadratmeter des Bauteils entweicht.

Wärmepumpe (WP)

Eine Wärmepumpe ist eine Einrichtung, die thermische Energie aus dem Erdreich, Grundwasser oder Außenluft aufnimmt und sie an ein Heizungssystem abgibt.

Wirkungsgrad

Verhältnis von abgegebener Leistung (Nutzen) zu zugeführter Leistung (Aufwand). Der Wirkungsgrad ist somit ein Maß für die Effizienz von Energiewandlungen und Energieübertragungen.

ZUB Helena

Software zur Bilanzierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach EnEV .

Literaturverzeichnis

Selbstständige Bücher

- Fisch, M.N.; Wilken, T.; Stähr, C. (2012):** EnergiePLUS. Gebäude und Quartiere als erneuerbare Energiequellen. Leonberg: M. Norbert Fisch (Hg.).
- Hegger, M.; Fafflok, C.; Hegger, J.; Passig, I. (2013):** Aktivhaus. Das Grundlagenwerk. Vom Passivhaus zum Energieplushaus. München: Verlag Georg D.W. Callwey
- Mertens, K. (2013):** Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologien und Praxis (2., neu überarbeitete Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- Miara, M. et al (2013):** Wärmepumpen. Heizen – Kühlen – Umweltenergie nutzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Quaschnig, V. (2007/2008):** Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Simulation (5. Auflage). München: Hanser Verlag.
- Suttor, W.; Johler, M.; Weisenberger, D. (2009):** Das Mini-Blockheizkraftwerk. Eine Heizung, die auch Strom erzeugt (5. Auflage). Heidelberg: C.F.Müller Verlag.
- Voss, K. ; Musall, E. (2011):** Nullenergie Gebäude. International Projekte zum Klimaneutralen Wohnen und Arbeiten (1. Auflage). München: Redaktion DETAIL Institut für internationale Architektur-Dokumentation.

Beiträge in Zeitschriften

- Marszal, A.J.; Heiselberg, P.; Bourrelle, J.S.; Musall, E.; Voss, K.; Sartori, I.; Napolitano, A. (2011):** Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. Energy and Buildings, Vol. 43, p. 971 – 979.
- Sartori, I.; Napolitano, A.; Voss, K. (2012):** Net zero buildings: A consistent definition framework. Energy and Buildings, Vol. 48, p. 220 – 232.
- Voss, K.; Musall, E.; Lichtmeß, M. (2010):** Vom Niedrigenergie- zum Nullenergiehaus: Standortbestimmung und Entwicklungsperspektiven. Bauphysik, 32.Jg., Heft 6, S. 424 - 434.
- Voss, K.; Musall, E.; Lichtmeß, M. (2010):** From Low Energy to Net Zero-Energy Buildings: Status and Perspectives. Journal of Green Building, Vol. 6, No. 1, p. 46 – 57.
- Voss, K.; Sartori, I.; Lollini, R. (2012):** Nearly-zero, Net zero and Plus Energy Buildings – How definitions & regulations affect the solutions. REHVA Journal, p. 23 – 27.
- Zirngibl, J. (2014):** Nearly Zero Energy Buildings (nZEB) in the CEN draft standard: REHVA Journal, p. 10-13.

Forschungsberichte

- Bost, M.; Hirschl, B.; Aretz, A. (2012):** Effekte von Eigenverbrauch und Netzparität bei der Photovoltaik. München: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung / Studie im Auftrag von Greenpeace Energy eG.
- IWU (2005):** Deutsche Gebäudetypologie - Dokumentation. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH.
- Loga, T.; Brunnengräber, B. (1996):** Jahresdauerlinien für Niedrigenergiesiedlungen. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH / Büro für ökologische Energienutzung.
- Loga, T.; Diefenbach, N. et al. (2013):** TABULA Calculation Method – Energy Use for Heating and Domestic Hot Water. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH.
- Loga, T.; Großklos, M.; Feist, W. (1999):** Ein Jahr in der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH / Passivhaus Institut.
- Loga, T. et al. (2014):** Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R.: Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweite erweiterte Auflage; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2014 (Entwurf)
- Wirth, H. (2014):** Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

Internetquellen

- <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/ma%C3%9Fnahmen-im-ueberblick.html> (Zugriff am 11.08.14): Bundesregierung Deutschland.
- http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1422/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/ArchivDatenMeldgn/ArchivDatenMeldgn_node.html (Zugriff am 06.08.14): Bundesnetzagentur.
- http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/ (Zugriff am 09.08.14): Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
- <http://www.dwd.de/TRY> (Zugriff am 07.08.14): Deutscher Wetterdienst.
- http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/Bauen/anlage-1-definition_und_berechnungsgrundlage.pdf?__blob=publication_file (Zugriff am 30.07.14): Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf) (Zugriff am 06.08.14): BDEW – Strompreisanalyse Mai 2013. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. .

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 10.08.14): Daten zur Energiepreisentwicklung (2014). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Normen

DIN V 18599 (2011-12): Energetische Bewertung von Gebäuden.

DIN EN ISO 13790 (2008-09): Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung.

prEN 15603 (2013): Energy Performance of buildings – Overarching standard EPBD.

EPBD (2010): Energy Performance of Buildings Directive.

Anhang

Anhang A: Eingabe Basisvariante in ZUB Helena

In den Bereichen „Gebäudetechnik“ und „Anlagentechnik“ werden die Varianten festgesetzt.

- Gebäudetechnik

Die Geometrie des EFH ist bereits eingestellt. Zu jedem Bauteil werden hier die U-Werte für das Passivhaus eingetragen.

- Anlagentechnik

Unter dem Abschnitt „Erzeugereinheiten“ wird die Wärmepumpe als Wärmeerzeuger für Heizung und Warmwasser ausgewählt. Als Vorlauftemperatur wird der Wert von 35°C eingestellt, als Rücklauftemperatur 28°C. Die Ausführungsart der Pumpe läuft über eine Erdsonde. Da bei einer Berechnung nach EnEV eine Wärmepumpe im monovalenten Betrieb nicht ausreichend ist um einen Deckungsanteil für die Wärmeherzeugung von 100% zu erreichen, wird die Trinkwasserherzeugung im bivalenten Betrieb über einen Heizstab ergänzt. Für alle weiteren Anlagenparameter der Wärmepumpe können, wie in Abbildung 33 zu erkennen ist, Standardwerte aus ZUB Helena übernommen werden, da es Inhalt dieser Analyse sein soll, eine beispielhafte, durchschnittliche Wärmepumpe abzubilden.

Unter dem Abschnitt „Verteilsystem“ wird für die Heizung eine Fußbodenheizung eingestellt.

Auch die Wohnungslüftungsanlage wird über Standardwerte der Software angelegt. Es handelt sich um ein Zu- und Abluftsystem.

Unter dem Abschnitt „Strom aus erneuerbaren Energien“ wird die PV Anlage eingestellt. Das Anlegen mehrerer Anlagen mit verschiedenen Neigungen und Orientierungen ist an dieser Stelle nicht möglich. Für die Basisvariante ist die PV Anlage auf die nach Südost gerichtete Dachseite (24° Neigung) und das ebenfalls nach Südost gerichtete Garagendach (18° Neigung) geplant. Die Dachseite Richtung Nordwest wird aufgrund der ungünstigen Himmelsrichtung nicht geplant. Für die Einstellung in ZUB Helena bedeutet dies, dass der Mittelwert zwischen den beiden Neigungen, also 30° verwendet wird. 30° entspricht zwar der optimalen Neigung für eine PV Anlage, die Ergebnisse wurden aber mit denen der in 3.2.3.1 beschriebenen PV-Simulation (diese wurde separat für die Dach- und die Garagendachfläche durchgeführt) abgeglichen. Aufgrund der geringen Abweichung kann die Einstellung in ZUB Helena beibehalten werden.

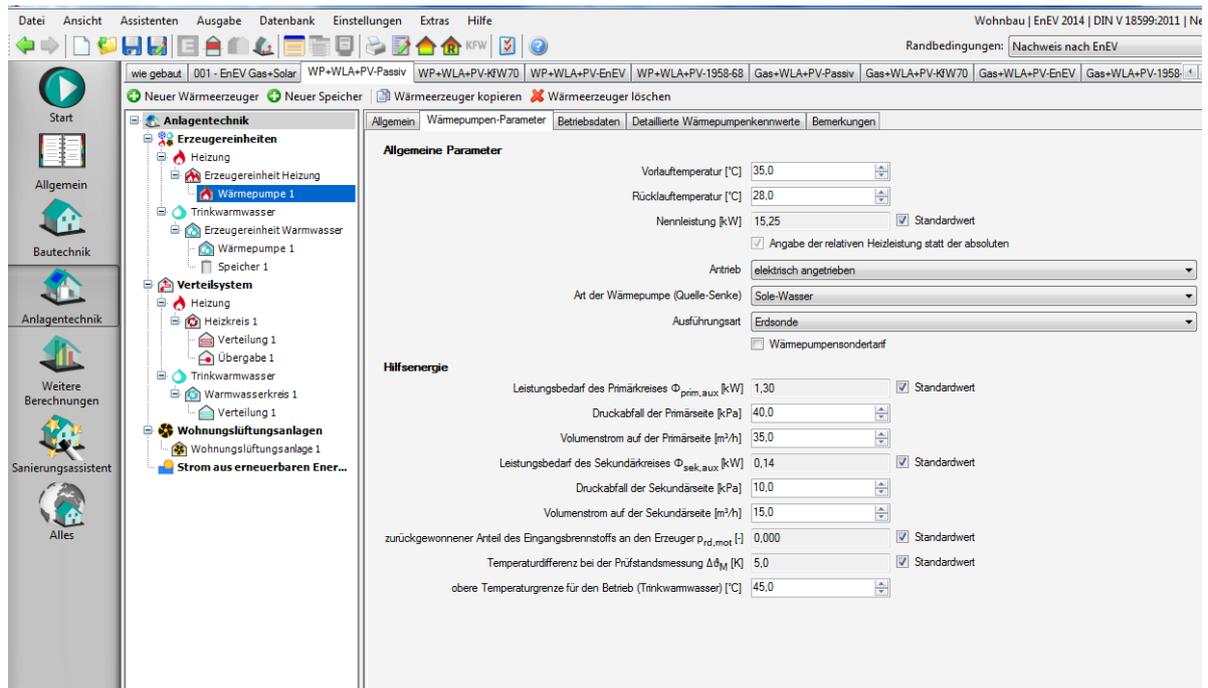


Abbildung 33: Anlagenparameter der Wärmepumpe der Basisvariante¹⁰⁰

Für die angelegte Variante lässt sich anschließend der Ergebnisbericht aus ZUB Helena ausgeben. Dieser kann zum einen als PDF erstellt werden und zum anderen als detaillierte Excel Ausgabe. Das PDF dient, wie in den Ausschnitten in Abbildung 34 und Abbildung 35 zu sehen ist dem ersten Überblick über die verfügbaren Ergebniswerte. Die Excel Datei umfasst weit mehr Ergebnisse als das PDF Dokument, ist aber mit über 100 verschiedenen Tabellenblättern eher unübersichtlich. Das Tabellenblatt „§5 EnEV“ zeigt beispielsweise, wie es Abbildung 36 zu entnehmen ist, den Anteil des monatlichen elektrischen Endenergiebedarfs, der durch die PV Anlage gedeckt wird.

¹⁰⁰ Abbildung entnommen aus ZUB Helena (23.07.14).



Gebäudeergebnisse

Jährlicher Nutzenergiebedarf	spezifisch [kWh/(m²a)]	absolut [kWh/a]
Heizung	10,83	2.865,77
Trinkwarmwasser	7,33	1.940,84
Gesamt	18,16	4.806,60

Jährlicher Endenergiebedarf (brennwertbezogen)	spezifisch [kWh/(m²a)]	absolut [kWh/a]
Heizung	3,64	964,54
Trinkwarmwasser	0,04	9,54
Gesamt	3,68	974,08

Endenergiebedarf nach Energieträgern (brennwertbezogen)	spezifisch [kWh/(m²a)]	absolut [kWh/a]
Strom-Mix	12,56	3.323,1
Korrektur nach §5 EnEV	-8,88	-2.349,0
Gesamt	3,68	974,1

Jährlicher Primärenergiebedarf (heizwertbezogen)	spezifisch [kWh/(m²a)]	absolut [kWh/a]
Heizung	8,75	2.314,89
Trinkwarmwasser	0,09	22,89
Gesamt	8,83	2.337,78

EnEV-Werte	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert
spez. Transmissionswärmeverlust H'_T [W/(m²K)]	0,175	0,400	43,8 %
spez. Primärenergiebedarf [kWh/(m²a)]	8,83	48,38	18,3 %

Abbildung 34: Gebäudeergebnisse Basisvariante¹⁰¹

¹⁰¹ Abbildung entnommen aus ZUB Helena (23.07.14).

Strom aus erneuerbaren Energien nach §5 EnEV 2014

Monat	Strom regenerativ [kWh/Monat]	Korrekturen der Endenergie [kWh/Monat]	
		Warmwasser	Heizung
Januar	236,1	127,4	108,8
Februar	241,1	114,7	126,4
März	585,2	125,5	139,9
April	1.063,2	119,2	63,4
Mai	1.165,3	120,9	65,5
Juni	1.202,3	115,7	63,4
Juli	1.088,3	118,4	65,5
August	995,9	118,7	65,5
September	730,3	116,9	63,4
Oktober	523,6	123,1	79,5
November	188,8	121,8	67,0
Dezember	118,1	118,1	0,0
Gesamt	8.138,2	1.440,4	908,6

Endenergie (elektrisch)

	Bedarf [kWh/a]	gedeckt durch erneuerbare Energien [kWh/a]	Deckungsanteil
Heizung	1.873,1	908,6	48,5 %
Warmwasser	1.449,9	1.440,4	99,3 %
Gesamt	3.323,1	2.349,0	70,7 %

Photovoltaik gemäß DIN EN 15316-4-6

Spitzenleistung P_{pk} [kW]	9,2
Art des Photovoltaikmoduls	Monokristallines Silizium
Art der Gebäudeintegration	Mäßig belüftete Module, < 0,5 m auf Dach aufgesetzt
Systemleistungsfaktor f_{perf} [-]	0,75
Ausrichtung	Südost
Winkel	30°

Abbildung 35: Strom aus erneuerbaren Energien Basisvariante¹⁰²

¹⁰² Abbildung entnommen aus ZUB Helena (23.07.14).

	A	B	C	D
1	Monat	Strom regenerativ ekturen der Endenergie [kWh/Monat]		
2		[kWh/Monat]	Warmwasser	Heizung
3	Januar	236,1	127,4	108,8
4	Februar	241,1	114,7	126,4
5	März	585,2	125,5	139,9
6	April	1.063,20	119,2	63,4
7	Mai	1.165,30	120,9	65,5
8	Juni	1.202,30	115,7	63,4
9	Juli	1.088,30	118,4	65,5
10	August	995,9	118,7	65,5
11	September	730,3	116,9	63,4
12	Oktober	523,6	123,1	79,5
13	November	188,8	121,8	67,0
14	Dezember	118,1	118,1	0,0
15	Gesamt	8.138,20	1.440,40	908,6
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				

Abbildung 36: Excel Ergebnisbericht Basisvariante¹⁰³

Anhang B: Eingabe im „Data Boy“

Im Steuerungsblatt des Eingabetools ist, wie aus Abbildung 37 ersichtlich wird, der Dateiname der Excel Datei des EBD-Tools einzutragen, um die beiden Dateien zu verknüpfen. In diesem Tabellenblatt ist außerdem unter dem Abschnitt „Laden eines Datensatzes in die Arbeitsmappe“ der Name der Basisvariante aus einer Dropdown-Liste auszuwählen. Bei Ausführen des Data-Boy Tools werden die Eingabedaten dann an den entsprechenden Stellen in das EBD-Tool eingefügt. Die Ergebniswerte werden aus dem EBD-Tool ausgelesen und in das Tabellenblatt „Ausgabedaten“ des Data-Boy Tools eingetragen.

¹⁰³ Abbildung entnommen aus Ergebnisbericht ZUB Helena (23.07.14).

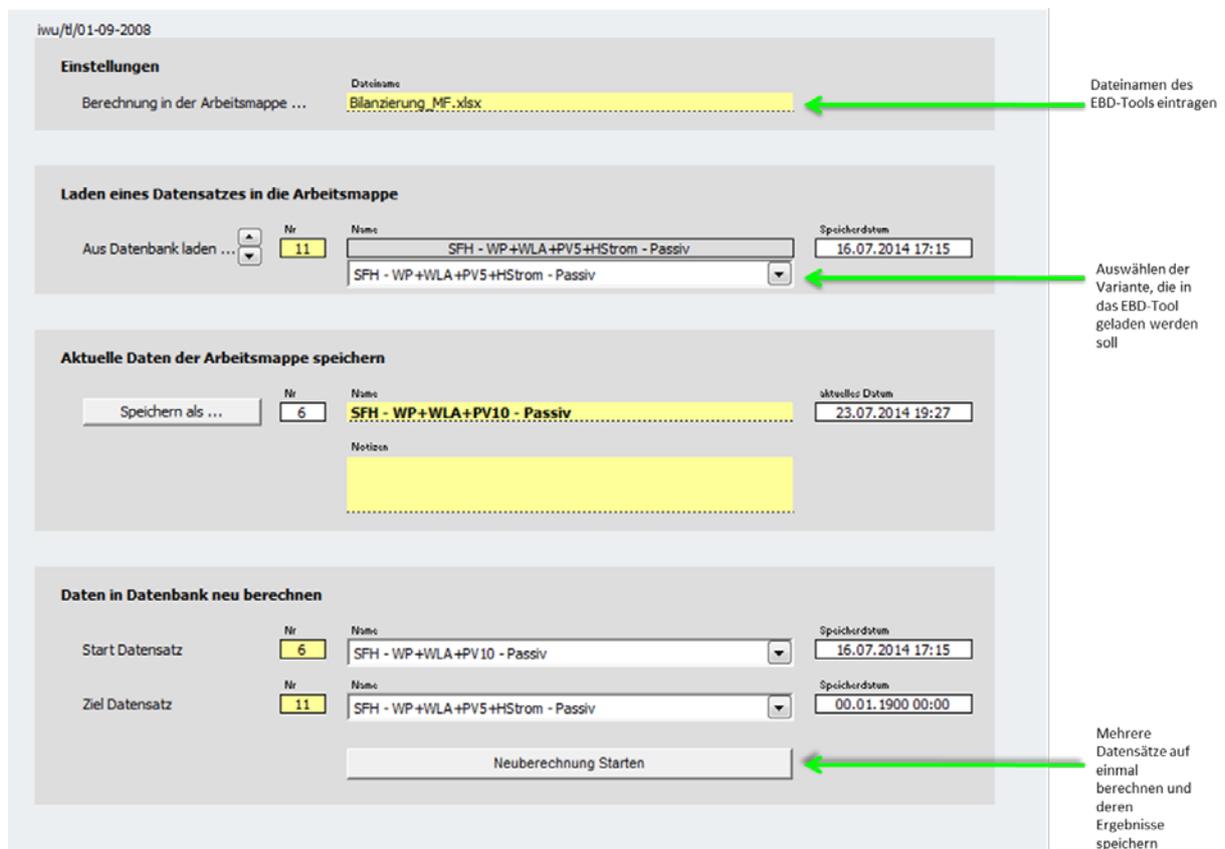


Abbildung 37: Eingabefeld Databoy¹⁰⁴

Anhang C: Tabellenwerte des Eigenbedarfsdeckungsanteils

Im Folgenden ist das gesamte im Rahmen dieser Arbeit erstellte Tabellenwerk aufgeführt. Der Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$ wird in Abhängigkeit des Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el} angegeben. Die Tabellenwerte für $\alpha_{el,prod}$ wurden zwischen den für bestimmte PV Anlagengrößen berechneten Werten linear interpoliert. Die Angabe „n.V.“ (nicht verfügbar) bedeutet, dass zum Teil die Werte für $\alpha_{el,prod}$ bei großem γ_{el} nicht mittels linearer Interpolation bestimmt werden können. Diese Werte wären nur mittels Extrapolation abschätzbar.

Sortiert sind die Tabellenwerte nach den beiden Verrechnungsräumen mit (Tabelle 12) und ohne (Tabelle 13) Haushaltsstrom und nach den Verrechnungsschrittweiten Monat, Tag und Stunde. Die Verrechnungsschrittweite Jahr wurde nicht aufgeführt, da die Jahreswerte nicht interpoliert werden müssen. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 erläutert, gilt für diese per Definition:

$$\alpha_{el,prod} = \gamma_{el} \text{ für } \gamma_{el} < 1 \text{ und } \alpha_{el,prod} = 1 \text{ für } \gamma_{el} \geq 1$$

¹⁰⁴ Abbildung selbst erstellt (23.07.14).

Der Code in Tabelle 11 beschreibt die verschiedenen Varianten:

Gebäudedaten					
Gebäudetyp		Wärmeschutz-Standard		Anlagentechnik	
Code	Beschreibung	Code	Beschreibung	Code	Beschreibung
G1	Einfamilienhaus	W1	Passiv	A1	Wärmepumpe + WLA
G2	Reihenhaus	W2	KfW70	A2	Brennwertkessel + WLA
G3	Mehrfamilienhaus	W3	EnEV 2014	A3	BHKW + Brennwertkessel + WLA
		W4	1958-68	A4	Brennwertkessel

Stromerzeugung	
Code	Beschreibung
PV	Photovoltaik
KWK	BHKW

Verrechnungsraum		Verrechnungsschrittweite	
Code	Beschreibung	Code	Beschreibung
1000	Hilfs(H+WW)	B1	Jahr
1100	Hilfs(H+WW+WLA)	B2	Monat
1010	Hilfs(H+WW)+H+WW	B3	Tag
1110	Hilfs(H+WW+WLA)+H+WW	B4	Stunde
XXX1	... + HStrom		

Tabelle 11: Bezeichnungs-Code der Variationsparameter¹⁰⁵

Mit Haushaltsstrom:

Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el}	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
Monat	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
<B2>.<G1-W1-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	22%	41%	62%	70%	75%	83%	90%	99%
<B2>.<G1-W2-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	22%	41%	57%	64%	69%	77%	89%	98%
<B2>.<G1-W3-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	22%	41%	54%	60%	67%	75%	92%	100%
<B2>.<G1-W4-A1>.<PV>.<1111>	1%	9%	20%	30%	43%	53%	59%	70%	n.V.	n.V.
<B2>.<G1-W1-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	39%	68%	80%	86%	92%	98%	100%
<B2>.<G1-W2-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	39%	68%	80%	85%	91%	98%	100%
<B2>.<G1-W3-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	39%	68%	79%	85%	91%	98%	100%
<B2>.<G1-W4-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	23%	38%	68%	75%	82%	89%	96%	100%
<B2>.<G1-W1-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	10%	25%	50%	76%	98%	99%	100%	100%	100%
<B2>.<G1-W2-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	10%	24%	48%	78%	95%	100%	100%	100%	100%
<B2>.<G1-W3-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	9%	21%	43%	78%	92%	100%	100%	100%	100%
<B2>.<G1-W4-A3>.<PV+KWK>.<1101>	0%	4%	11%	21%	42%	64%	85%	100%	100%	100%
<B2>.<G1-W1-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	38%	61%	81%	86%	94%	98%	100%

¹⁰⁵ Tabelle selbst erstellt (01.08.14).

Anhang

Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf Y_{el}	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
<B2>.<G1-W2-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	38%	61%	80%	85%	93%	98%	100%
<B2>.<G1-W3-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	38%	61%	80%	84%	93%	98%	100%
<B2>.<G1-W4-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	24%	37%	62%	75%	80%	87%	97%	99%
<B2>.<G2-W1-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	25%	48%	65%	71%	77%	86%	n.V.	n.V.
<B2>.<G2-W2-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	25%	44%	59%	67%	74%	84%	n.V.	n.V.
<B2>.<G2-W3-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	25%	42%	56%	65%	72%	82%	n.V.	n.V.
<B2>.<G2-W4-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	22%	32%	47%	58%	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.
<B2>.<G2-W1-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	25%	47%	73%	81%	86%	92%	98%	n.V.
<B2>.<G2-W2-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	25%	47%	72%	81%	85%	92%	98%	n.V.
<B2>.<G2-W3-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	25%	47%	72%	81%	85%	91%	98%	n.V.
<B2>.<G2-W4-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	25%	46%	68%	78%	82%	91%	97%	n.V.
<B2>.<G2-W1-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	10%	25%	50%	87%	97%	100%	100%	100%	n.V.
<B2>.<G2-W2-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	10%	25%	50%	91%	100%	100%	100%	100%	n.V.
<B2>.<G2-W3-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	9%	23%	47%	90%	100%	100%	100%	100%	n.V.
<B2>.<G2-W4-A3>.<PV+KWK>.<1101>	0%	4%	10%	20%	40%	60%	80%	100%	100%	n.V.
<B2>.<G2-W1-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	50%	73%	80%	86%	91%	99%	n.V.
<B2>.<G2-W2-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	49%	72%	79%	85%	90%	99%	n.V.
<B2>.<G2-W3-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	49%	72%	79%	85%	90%	99%	n.V.
<B2>.<G2-W4-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	46%	67%	76%	81%	88%	97%	n.V.
<B2>.<G3-W1-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	25%	48%	69%	76%	81%	87%	97%	n.V.
<B2>.<G3-W2-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	25%	46%	63%	71%	76%	85%	96%	n.V.
<B2>.<G3-W3-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	25%	44%	61%	69%	75%	84%	95%	n.V.
<B2>.<G3-W4-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	22%	32%	43%	52%	57%	67%	n.V.	n.V.
<B2>.<G3-W1-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	46%	71%	81%	85%	94%	97%	100%
<B2>.<G3-W2-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	46%	71%	81%	86%	94%	97%	100%
<B2>.<G3-W3-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	46%	71%	81%	86%	93%	97%	100%
<B2>.<G3-W4-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	47%	70%	80%	85%	93%	97%	100%
<B2>.<G3-W1-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	10%	25%	49%	85%	94%	97%	100%	100%	100%
<B2>.<G3-W2-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	10%	25%	50%	87%	99%	100%	100%	100%	100%
<B2>.<G3-W3-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	10%	24%	48%	84%	99%	100%	100%	100%	100%
<B2>.<G3-W4-A3>.<PV+KWK>.<1101>	0%	4%	10%	19%	38%	58%	77%	100%	100%	100%
<B2>.<G3-W1-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	23%	42%	71%	79%	85%	93%	97%	100%
<B2>.<G3-W2-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	23%	43%	70%	79%	85%	93%	97%	100%
<B2>.<G3-W3-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	23%	43%	70%	79%	84%	93%	97%	100%
<B2>.<G3-W4-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	23%	43%	69%	79%	84%	94%	97%	100%
Tag										
<B3>.<G1-W1-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	21%	38%	57%	64%	68%	75%	82%	90%
<B3>.<G1-W2-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	21%	38%	52%	58%	64%	70%	78%	88%
<B3>.<G1-W3-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	21%	38%	50%	56%	61%	67%	78%	88%
<B3>.<G1-W4-A1>.<PV>.<1111>	1%	9%	19%	28%	39%	48%	53%	63%	n.V.	n.V.
<B3>.<G1-W1-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	37%	62%	73%	78%	83%	90%	95%
<B3>.<G1-W2-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	36%	62%	72%	77%	83%	90%	95%
<B3>.<G1-W3-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	24%	36%	62%	72%	77%	82%	89%	95%
<B3>.<G1-W4-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	22%	36%	62%	69%	75%	80%	87%	95%
<B3>.<G1-W1-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	10%	25%	50%	72%	90%	93%	97%	99%	100%
<B3>.<G1-W2-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	9%	22%	44%	74%	90%	96%	98%	100%	100%
<B3>.<G1-W3-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	8%	19%	38%	71%	87%	96%	99%	100%	100%
<B3>.<G1-W4-A3>.<PV+KWK>.<1101>	0%	4%	10%	20%	41%	61%	81%	99%	100%	100%
<B3>.<G1-W1-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	37%	56%	74%	77%	84%	90%	95%
<B3>.<G1-W2-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	37%	56%	73%	77%	83%	90%	95%
<B3>.<G1-W3-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	25%	37%	56%	72%	76%	83%	89%	94%
<B3>.<G1-W4-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	24%	35%	57%	68%	73%	79%	87%	93%
<B3>.<G2-W1-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	25%	45%	59%	64%	69%	76%	n.V.	n.V.
<B3>.<G2-W2-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	24%	41%	55%	61%	67%	73%	n.V.	n.V.
<B3>.<G2-W3-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	24%	39%	52%	59%	65%	71%	n.V.	n.V.
<B3>.<G2-W4-A1>.<PV>.<1111>	1%	10%	21%	30%	43%	51%	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.
<B3>.<G2-W1-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	25%	46%	65%	73%	77%	82%	89%	n.V.
<B3>.<G2-W2-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	25%	45%	65%	73%	77%	82%	89%	n.V.
<B3>.<G2-W3-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	25%	45%	65%	73%	76%	82%	88%	n.V.
<B3>.<G2-W4-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	25%	44%	61%	70%	73%	80%	86%	n.V.

Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el}	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
<B4>.<G3-W4-A1>.<PV>.<1111>	1%	8%	15%	21%	26%	30%	32%	36%	n.V.	n.V.
<B4>.<G3-W1-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	18%	26%	36%	39%	41%	45%	47%	50%
<B4>.<G3-W2-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	18%	26%	36%	39%	41%	44%	47%	50%
<B4>.<G3-W3-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	18%	26%	36%	39%	41%	44%	47%	50%
<B4>.<G3-W4-A2>.<PV>.<1101>	1%	10%	17%	27%	35%	39%	41%	44%	46%	49%
<B4>.<G3-W1-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	9%	24%	44%	54%	57%	59%	61%	62%	63%
<B4>.<G3-W2-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	8%	20%	40%	56%	61%	63%	64%	66%	67%
<B4>.<G3-W3-A3>.<PV+KWK>.<1101>	1%	7%	17%	34%	54%	61%	63%	65%	66%	68%
<B4>.<G3-W4-A3>.<PV+KWK>.<1101>	0%	3%	7%	15%	29%	44%	58%	72%	75%	76%
<B4>.<G3-W1-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	19%	26%	36%	40%	42%	45%	47%	50%
<B4>.<G3-W2-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	19%	26%	36%	40%	42%	45%	47%	50%
<B4>.<G3-W3-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	19%	26%	36%	40%	42%	45%	47%	50%
<B4>.<G3-W4-A4>.<PV>.<1001>	1%	10%	18%	26%	35%	39%	41%	44%	46%	50%

Tabelle 12: Tabellenwerte alle Varianten mit Haushaltsstrom¹⁰⁶

Ohne Haushaltsstrom:

Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el}	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
Monat										
<B2>.<G1-W1-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	22%	41%	62%	70%	75%	83%	90%	99%
<B2>.<G1-W2-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	21%	30%	47%	54%	60%	69%	80%	96%
<B2>.<G1-W3-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	19%	29%	44%	53%	58%	67%	79%	96%
<B2>.<G1-W4-A1>.<PV>.<1110>	1%	8%	17%	27%	39%	49%	57%	67%	n.V.	n.V.
<B2>.<G1-W1-A2>.<PV>.<1100>	1%	9%	22%	44%	69%	74%	79%	89%	98%	100%
<B2>.<G1-W2-A2>.<PV>.<1100>	1%	9%	22%	44%	66%	72%	78%	89%	97%	100%
<B2>.<G1-W3-A2>.<PV>.<1100>	1%	9%	22%	44%	65%	71%	77%	88%	97%	100%
<B2>.<G1-W4-A2>.<PV>.<1100>	1%	9%	23%	45%	54%	63%	71%	83%	95%	100%
<B2>.<G1-W1-A3>.<PV+KWK>.<1100>	1%	5%	13%	27%	54%	81%	100%	100%	100%	100%
<B2>.<G1-W2-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	4%	10%	20%	41%	61%	82%	100%	100%	100%
<B2>.<G1-W3-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	3%	9%	17%	35%	52%	69%	100%	100%	100%
<B2>.<G1-W4-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	2%	4%	8%	16%	24%	32%	48%	80%	100%
<B2>.<G1-W1-A4>.<PV>.<1000>	0%	3%	9%	17%	34%	51%	68%	89%	91%	97%
<B2>.<G1-W2-A4>.<PV>.<1000>	0%	3%	9%	17%	35%	52%	70%	81%	85%	97%
<B2>.<G1-W3-A4>.<PV>.<1000>	0%	4%	9%	18%	36%	54%	72%	76%	83%	100%
<B2>.<G1-W4-A4>.<PV>.<1000>	1%	5%	13%	26%	48%	54%	59%	71%	89%	98%
<B2>.<G2-W1-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	25%	44%	58%	66%	71%	81%	93%	n.V.
<B2>.<G2-W2-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	25%	39%	53%	61%	67%	77%	88%	n.V.
<B2>.<G2-W3-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	25%	37%	51%	58%	64%	75%	90%	n.V.
<B2>.<G2-W4-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	19%	29%	43%	52%	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.
<B2>.<G2-W1-A2>.<PV>.<1100>	1%	10%	25%	38%	62%	82%	87%	95%	99%	100%
<B2>.<G2-W2-A2>.<PV>.<1100>	1%	10%	25%	38%	62%	80%	85%	93%	98%	100%
<B2>.<G2-W3-A2>.<PV>.<1100>	1%	10%	25%	38%	62%	79%	84%	92%	98%	100%
<B2>.<G2-W4-A2>.<PV>.<1100>	1%	10%	22%	37%	61%	69%	76%	86%	93%	100%
<B2>.<G2-W1-A3>.<PV+KWK>.<1100>	1%	6%	16%	32%	64%	96%	100%	100%	100%	100%
<B2>.<G2-W2-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	5%	12%	25%	49%	74%	99%	100%	100%	100%
<B2>.<G2-W3-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	4%	10%	21%	42%	62%	83%	100%	100%	100%
<B2>.<G2-W4-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	2%	4%	8%	15%	23%	31%	46%	77%	100%
<B2>.<G2-W1-A4>.<PV>.<1000>	1%	8%	19%	39%	64%	69%	74%	85%	97%	100%
<B2>.<G2-W2-A4>.<PV>.<1000>	1%	8%	20%	40%	59%	65%	72%	85%	94%	99%
<B2>.<G2-W3-A4>.<PV>.<1000>	1%	8%	20%	40%	57%	63%	70%	84%	93%	99%
<B2>.<G2-W4-A4>.<PV>.<1000>	1%	9%	23%	33%	48%	62%	67%	77%	91%	97%
<B2>.<G3-W1-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	23%	37%	65%	70%	76%	85%	94%	100%
<B2>.<G3-W2-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	21%	36%	55%	63%	68%	78%	87%	98%

¹⁰⁶ Tabelle selbst erstellt (07.08.14).

Anhang

Verhältnis Stromproduktion zu Strombedarf γ_{el}	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,5	2	3	5	10
	Eigenbedarfsdeckungsanteil $\alpha_{el,prod}$									
<B3>.<G3-W2-A4>.<PV>.<1000>	0%	4%	9%	18%	36%	53%	56%	61%	71%	86%
<B3>.<G3-W3-A4>.<PV>.<1000>	0%	4%	9%	19%	38%	53%	56%	61%	72%	86%
<B3>.<G3-W4-A4>.<PV>.<1000>	1%	5%	13%	26%	48%	52%	56%	64%	78%	88%
Stunde										
<B4>.<G1-W1-A1>.<PV>.<1110>	1%	10%	17%	24%	33%	36%	38%	42%	44%	48%
<B4>.<G1-W2-A1>.<PV>.<1110>	1%	8%	15%	19%	26%	29%	32%	35%	38%	44%
<B4>.<G1-W3-A1>.<PV>.<1110>	1%	8%	14%	18%	25%	28%	30%	34%	37%	43%
<B4>.<G1-W4-A1>.<PV>.<1110>	1%	7%	13%	19%	24%	28%	31%	35%	n.V.	n.V.
<B4>.<G1-W1-A2>.<PV>.<1100>	0%	4%	10%	21%	33%	35%	37%	40%	45%	47%
<B4>.<G1-W2-A2>.<PV>.<1100>	0%	4%	11%	21%	32%	34%	36%	40%	44%	47%
<B4>.<G1-W3-A2>.<PV>.<1100>	0%	4%	11%	21%	31%	33%	35%	40%	43%	46%
<B4>.<G1-W4-A2>.<PV>.<1100>	1%	5%	13%	24%	27%	31%	34%	38%	41%	44%
<B4>.<G1-W1-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	4%	9%	18%	35%	53%	66%	66%	68%	69%
<B4>.<G1-W2-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	3%	6%	13%	26%	39%	52%	64%	66%	67%
<B4>.<G1-W3-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	2%	5%	10%	20%	31%	41%	59%	62%	65%
<B4>.<G1-W4-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	1%	3%	5%	11%	16%	21%	32%	53%	69%
<B4>.<G1-W1-A4>.<PV>.<1000>	0%	2%	4%	8%	16%	23%	31%	41%	42%	46%
<B4>.<G1-W2-A4>.<PV>.<1000>	0%	2%	4%	8%	17%	25%	33%	38%	40%	44%
<B4>.<G1-W3-A4>.<PV>.<1000>	0%	2%	4%	9%	17%	26%	35%	36%	38%	44%
<B4>.<G1-W4-A4>.<PV>.<1000>	0%	3%	7%	14%	25%	27%	28%	31%	36%	40%
<B4>.<G2-W1-A1>.<PV>.<1110>	1%	9%	16%	25%	30%	33%	35%	38%	42%	n.V.
<B4>.<G2-W2-A1>.<PV>.<1110>	1%	8%	16%	23%	28%	31%	33%	36%	40%	n.V.
<B4>.<G2-W3-A1>.<PV>.<1110>	1%	8%	16%	22%	27%	30%	32%	36%	40%	n.V.
<B4>.<G2-W4-A1>.<PV>.<1110>	1%	8%	14%	19%	25%	29%	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.
<B4>.<G2-W1-A2>.<PV>.<1100>	1%	8%	20%	25%	31%	37%	38%	41%	44%	46%
<B4>.<G2-W2-A2>.<PV>.<1100>	1%	8%	20%	25%	31%	36%	38%	41%	43%	46%
<B4>.<G2-W3-A2>.<PV>.<1100>	1%	8%	20%	24%	31%	35%	37%	40%	43%	45%
<B4>.<G2-W4-A2>.<PV>.<1100>	1%	9%	17%	22%	29%	32%	34%	37%	39%	43%
<B4>.<G2-W1-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	4%	11%	22%	43%	65%	68%	69%	70%	71%
<B4>.<G2-W2-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	3%	8%	15%	31%	46%	61%	65%	67%	68%
<B4>.<G2-W3-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	2%	6%	11%	23%	34%	45%	58%	63%	65%
<B4>.<G2-W4-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	1%	2%	5%	10%	15%	20%	30%	49%	68%
<B4>.<G2-W1-A4>.<PV>.<1000>	0%	4%	9%	19%	30%	32%	34%	37%	41%	44%
<B4>.<G2-W2-A4>.<PV>.<1000>	0%	4%	10%	20%	28%	30%	32%	37%	40%	43%
<B4>.<G2-W3-A4>.<PV>.<1000>	0%	4%	10%	20%	28%	30%	32%	36%	39%	42%
<B4>.<G2-W4-A4>.<PV>.<1000>	1%	6%	15%	19%	24%	28%	30%	33%	36%	39%
<B4>.<G3-W1-A1>.<PV>.<1110>	1%	9%	19%	24%	34%	36%	39%	42%	45%	49%
<B4>.<G3-W2-A1>.<PV>.<1110>	1%	9%	16%	22%	30%	34%	36%	39%	42%	47%
<B4>.<G3-W3-A1>.<PV>.<1110>	1%	9%	15%	22%	29%	32%	34%	38%	41%	46%
<B4>.<G3-W4-A1>.<PV>.<1110>	1%	7%	13%	18%	24%	27%	30%	33%	n.V.	n.V.
<B4>.<G3-W1-A2>.<PV>.<1100>	0%	5%	11%	23%	30%	32%	35%	39%	42%	45%
<B4>.<G3-W2-A2>.<PV>.<1100>	0%	5%	12%	24%	30%	32%	35%	39%	42%	45%
<B4>.<G3-W3-A2>.<PV>.<1100>	0%	5%	12%	24%	29%	32%	35%	39%	42%	45%
<B4>.<G3-W4-A2>.<PV>.<1100>	1%	5%	13%	26%	29%	32%	35%	39%	42%	45%
<B4>.<G3-W1-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	3%	8%	17%	33%	50%	67%	69%	70%	71%
<B4>.<G3-W2-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	2%	6%	12%	25%	37%	50%	65%	68%	69%
<B4>.<G3-W3-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	2%	5%	10%	20%	31%	41%	60%	64%	66%
<B4>.<G3-W4-A3>.<PV+KWK>.<1100>	0%	1%	2%	4%	8%	11%	15%	23%	38%	67%
<B4>.<G3-W1-A4>.<PV>.<1000>	0%	2%	4%	8%	16%	24%	29%	31%	33%	39%
<B4>.<G3-W2-A4>.<PV>.<1000>	0%	2%	5%	9%	19%	28%	29%	30%	34%	39%
<B4>.<G3-W3-A4>.<PV>.<1000>	0%	2%	5%	10%	20%	28%	29%	30%	34%	39%
<B4>.<G3-W4-A4>.<PV>.<1000>	0%	3%	7%	14%	26%	27%	29%	32%	37%	40%

Tabelle 13: Tabellenwerte alle Varianten ohne Haushaltsstrom¹⁰⁷

¹⁰⁷ Tabelle selbst erstellt (07.08.14).