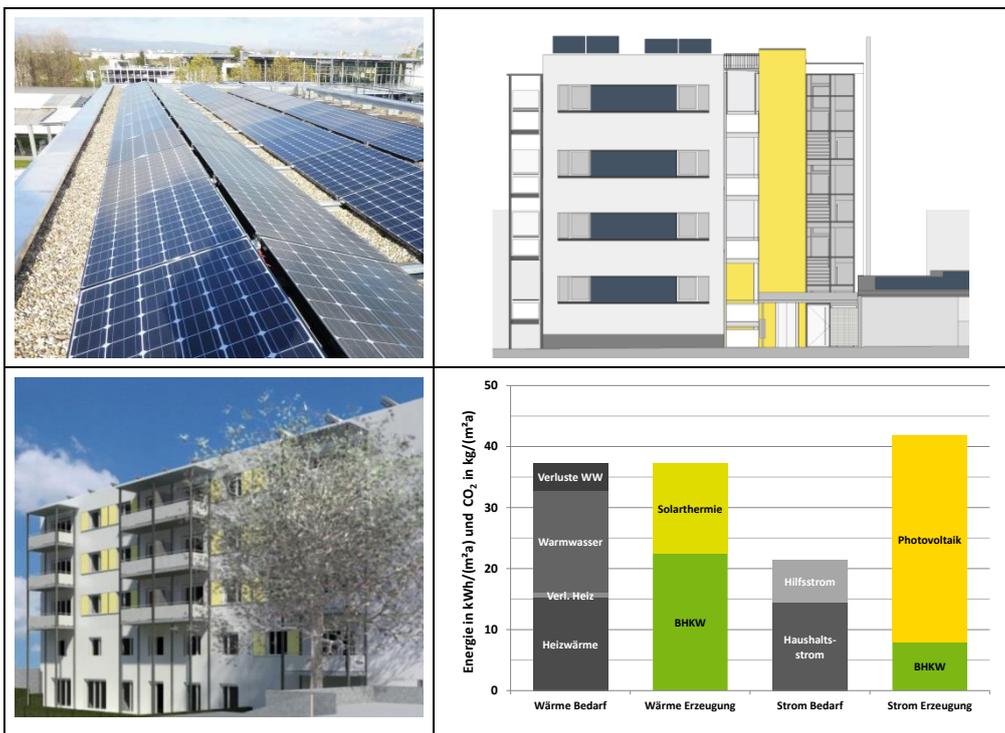


Passivhäuser mit Energiegewinn



Teilbericht

Wissenschaftliche Begleitung Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main

Bauherr:
ABG Frankfurt Holding GmbH

Eine Untersuchung im Auftrag von:



Hessisches Ministerium für
Umwelt, Energie, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz

Passivhäuser mit Energiegewinn-
Begleitung Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main

Autoren: Margrit Schaede
Marc Großklos

Reprotechnik: Reda Hatteh

1. Auflage
Darmstadt, den 31.10.2013

ISBN.: 978-3-941140-33-2
IWU-Bestellnummer: 03/13

INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH
Rheinstraße 65
64295 Darmstadt
Germany

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

Inhalt

1 Einleitung.....	9
1.1 Kurzdarstellung des Projektes Cordierstraße 4	10
1.2 Besondere Herausforderungen	14
1.3 Projektdurchführung	15
2 Das Passivhaus mit Energiegewinn.....	17
2.1 Definition Passivhaus mit Energiegewinn (PH + E).....	17
2.1.1 Gebäude mit Energieüberschuss	17
2.1.2 Passivhaus mit Energiegewinn (PH+E).....	18
2.2 Bilanzierungswerkzeuge	20
2.2.1 Passivhaus Projektierungs-Paket vs. EnEV2009/DIN V 18599	20
2.2.2 Primärenergiefaktoren nach GEMIS vs. DIN V 18599 und EnEV 2009	21
2.2.3 Weitere Bilanzierungsgrößen	26
2.3 Der Weg zum Energiegewinn	28
3 Reduktion des Energiebedarfs in allen Bedarfsbereichen.....	29
3.1 Reduktion des Wärmebedarfs.....	29
3.1.1 Reduktion des Heizwärmebedarfs – Neubau im Passivhaus-Standard	29
3.1.2 Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser	34
3.2 Reduktion des elektrischen Energiebedarfs.....	39
3.2.1 Reduktion des Hilfsstrombedarfs	39
3.2.2 Reduktion des Haushaltsstrombedarfs	42
3.3 Nutzerverhalten.....	44
4 Deckung des verbleibenden Restenergiebedarfs mit regenerativen Energien	45
4.1 Regenerative Energieträger.....	45
4.2 Wärmeerzeugung	46
4.2.1 Anlagentechnik Cordierstraße 4: Solarthermie und Blockheizkraftwerk	47
4.2.2 Solarthermie, Blockheizkraftwerk und Spitzenlastkessel	56
4.2.3 Wärmepumpe	58
4.2.4 Solarthermie und Wärmepumpe.....	62
4.3 Stromerzeugung	64
4.3.1 Photovoltaik	64
4.3.2 BHKW	72
4.4 Ausgleich von elektrischem Energiebedarf und –erzeugung - Elektrische Energiespeicher	74
4.4.1 Kennwerte	74
4.4.2 Typen elektrischer Energiespeicher	78
4.4.3 Auswirkungen des Einsatzes eines elektrischen Energiespeichers	78

5 Energiebilanz.....	88
5.1 Energiebilanz PHPP/ GEMIS.....	88
5.2 Bilanzergebnisse im Vergleich PHPP/GEMIS zu EnEV/DIN V 18599.....	90
6 Zusammenfassung und Ausblick	93
Literaturverzeichnis	95
Anhang A Grundrisse und Schnitte	99

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Frühe Gebäude mit dem Ziel „Ausgleich von Bedarf und Erzeugung“; links: Nullenergiehaus Dörpe (1989) , rechts: energieautarkes Solarhaus, Freiburg (1992)	9
Bild 2:	Lageplan des Gebäudes Cordierstraße 4 im Quartier	11
Bild 3:	Grundrisse einer Maisonette-Wohnung (Quelle: faktor10)	12
Bild 4:	Grundrisse einer 4-Zimmer Wohnung und einer 2-Zimmer Wohnung (Quelle: faktor10)	12
Bild 5:	Ansicht Ostseite, Erschließung des Gebäudes über Laubengänge (Quelle: faktor10)	13
Bild 6:	Ansicht Westseite (Quelle: faktor10)	13
Bild 7:	Bestandsgebäude (links); Perspektive Südost Planungsstand Herbst 2012 (rechts) (Quelle: faktor10)	14
Bild 8:	Bilanzgrenzen	19
Bild 9:	Entwicklung und Prognose kumulierter Energieaufwand nicht regenerativ für den deutschen Strommix	23
Bild 10:	Prozesskette für „Biomethan aus Mais dLUC“ [GEMIS]	24
Bild 11:	Vergleich der verschiedenen Varianten der Biomethan-Erzeugung, links: kumulierter Energieverbrauch, rechts: Treibhausgasemissionen	26
Bild 12:	Aufteilung des Nutzenergiebedarfs in kWh/(m ² a) des Gebäudes Cordierstraße 4	29
Bild 13:	Dämmung auf der Ostseite: EG EPS-Dämmung, im Bereich der Laubengänge Mineralwolle; oben: Planungsstand September2012; unten: Ausführung September 2013	31
Bild 14:	Wärmebrückenverluste Cordierstraße 4	32
Bild 15:	Ausführung des luftdichten Anschlusses der Fenster in der Bauphase	32
Bild 16:	Lüftungskonzept mit wohnungsweisen Lüftungsanlagen (links), eingesetztes Lüftungsgerät (rechts)	33
Bild 17:	Aufteilung des Energiebedarfs in kWh/(m ² a) des Gebäudes Cordierstraße 4, links ohne, rechts mit Optimierungsmaßnahmen zur Reduktion der Verteilverluste	34
Bild 18:	Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser: Erhöhte Dämmung der Rohrleitungen Warmwasser 250 % nach EnEV (links), Einsatz einer Diaphragmalyse (Mitte) und Rohr-in-Rohr-System (rechts)	35
Bild 19:	Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen zur Reduzierung des Wärmebedarfs für Warmwasser in der Cordierstraße 4	36
Bild 20:	Details der Wasserbehandlungsanlage Diaphragmalyse: Dosieranlage (links), Solebehälter mit Salztabletten(rechts)	37
Bild 21:	Einfluss der Warmwassertemperatur und der Dämmdicke auf die Verteilverluste in der Cordierstraße 4	37
Bild 22:	Energieeinsparung durch Haushaltsgeräte und Beleuchtung höchster Effizienzklassen	42
Bild 23:	Übersicht des elektrischen Energiebedarfs der Cordierstraße 4, berechnet mit dem PHPP 2012	43
Bild 24:	Gemessene mittlere Raumtemperaturen verschiedener energetisch modernisierter, vermieteter Mehrfamilienhäuser, aufgetragen über dem gemessenen Heizwärmeverbrauch [Großklos et al. 2013]	44
Bild 25:	Technikkonzept Cordierstraße 4 Version Herbst 2012 und Umsetzung	48
Bild 26:	Eingesetzte solarthermische Kollektoren: Auszug aus dem technischen Datenblatt (links), Darstellung zum CPC-Spiegel (rechts oben), Kollektoren während der Montage (rechts unten)	49

Bild 27:	Energieertrag pro m ² Kollektorfläche und Energieertrag pro m ² nutzbarer Dachfläche von Kollektoren mit unterschiedlich guter Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Fläche	50
Bild 28:	Warmwasserprofil für die Simulationen Solarthermie und BHKW	51
Bild 29:	Anlagenschema der Simulation der solarthermischen Anlage	52
Bild 30:	Mittlere Wärmeleistung der solarthermischen Anlage	52
Bild 31:	Wärmeerzeugung des BHKWs	53
Bild 32:	Einsatz von BHKW und Solarthermie: Energiebedarf und -erzeugung	53
Bild 33:	Einsatz von BHKW und Solarthermie: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO ₂ -Emissionen	54
Bild 34:	Einsatz BHKW und Solarthermie: Bilanzergebnisse abhängig vom Nutzerverhalten	55
Bild 35:	Einsatz von BHKW, Solarthermie und Spitzenlastkessel: Energiebedarf und -erzeugung	56
Bild 36:	Einsatz von BHKW, Solarthermie und Spitzenlastkessel: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO ₂ -Emissionen	57
Bild 37:	Einsatz einer Wärmepumpe: Energiebedarf und -erzeugung	58
Bild 38:	Einsatz einer Wärmepumpe: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO ₂ -Emissionen	59
Bild 39:	Einsatz einer Wärmepumpe: Bilanzergebnisse abhängig von der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe	60
Bild 40:	Einsatz einer Wärmepumpe: Bilanzergebnisse abhängig vom Nutzerverhalten bei einer Jahresarbeitszahl von 3,7	60
Bild 41:	Einsatz einer Wärmepumpe: Strombedarf des Gebäudes abhängig von Nutzerverhalten und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe	61
Bild 42:	Einsatz einer Wärmepumpe mit solarthermischer Anlage: Energiebedarf und -erzeugung	62
Bild 43:	Einsatz einer Wärmepumpe mit solarthermischer Anlage: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO ₂ -Emissionen	63
Bild 44:	Verschattung durch Baumbestand: links: Blick auf die Westseite des Gebäudes, rechts Blick auf die Südseite	64
Bild 45:	Photovoltaik: Planungsstand Juli 2012	66
Bild 46:	Photovoltaik: Planungsstand Januar 2013	67
Bild 47:	Photovoltaik: Planungsstand August 2013	68
Bild 48:	Photovoltaik: Realisierung Oktober-Dezember 2013	69
Bild 49:	Photovoltaik in Ost/West-Ausrichtung auf dem Dach Cordierstraße 4	70
Bild 50:	Simulationsergebnisse zur Energieerzeugung der Photovoltaik Cordierstraße 4	70
Bild 51:	Simulationsergebnisse zur Energieerzeugung der Photovoltaik auf dem Dach, Tagesgang	71
Bild 52:	Simulationsergebnisse der elektrischen Energieerzeugung durch das BHKW für das Projekt Cordierstraße 4	73
Bild 53:	Last- und Erzeugungsprofil links: Sommer, rechts: Winter	74
Bild 54:	Jahresmittelwerte der Deckungsrate bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung links für das Gebäude in der Cordierstraße 4, rechts für das Gebäude der Universität Wuppertal zum Solar Decathlon 2010	75
Bild 55:	links: Berechneter Erzeugungs- und Lastverlauf für das Projekt Cordierstraße 4; rechts: Berechneter Erzeugungs- und Lastverlauf für das Gebäude der Universität Wuppertal zum Solar Decathlon 2010	76

Bild 56:	Häufigkeit von Einspeisung (-) und Bezug (+) im Jahresmittel auf Basis von Stundenwerten; links ohne elektrischen Energiespeicher, rechts mit Speicher 36 kWh / 18,5 kW	77
Bild 57:	links: monatliche Einspeisung über dem monatlichen Bezug rechts: tägliche Einspeisung über dem täglichen Bezug	77
Bild 58:	Übersicht der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Elektrischer Energiespeicher [Quurck 2013]	78
Bild 59:	links: Gemessener Lastgang des Mehrfamilienhauses Rotlintstraße 122/124 [Großklos 2013], skaliert auf die Wohneinheiten des Gebäude in der Cordierstraße 4; rechts: prozentuale Häufigkeitsverteilung der Last	79
Bild 60:	Abhängigkeit der Deckungsrate von der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers und dessen maximaler elektrischer Leistung	80
Bild 61:	Deckungsrate für unterschiedliche maximale Leistungen des Elektrospeichers (links) und unterschiedliche nutzbare Kapazitäten (rechts)	80
Bild 62:	Aus dem Netz bezogene elektrische Energie in Abhängigkeit von der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers und dessen maximalen elektrischer Leistung	81
Bild 63:	Abhängigkeit des Netzbezugs von der maximalen elektrischen Leistung (links) und der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers (rechts)	81
Bild 64:	Anzahl der Vollladungen in Abhängigkeit von der maximalen elektrischen Leistung und der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers	82
Bild 65:	Anzahl der Lade-/Entladezyklen in Abhängigkeit von der maximalen elektrischen Leistung (links) und der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers (rechts)	83
Bild 66:	links: gespeicherte elektrische Energie und Netzbezug(+)/-einspeisung(-) bei 36 kWh/18,5 kW Elektrospeicher; rechts: gespeicherte elektrische Energie und Netzbezug(+)/-einspeisung(-) bei 12 kWh/6 kW	84
Bild 67:	Deckungsraten für unterschiedliche Auslegungen des Elektrospeichers und verschiedene Bilanzierungszeiträume	84
Bild 68:	Verlauf von Lastgang(+), Erzeugung(-), Netzeinspeisung(-) und gespeicherter Kapazität; links: bei Elektrospeicher 36 kWh/18,5 kW, rechts: bei 24 kWh/18,5 kW	85
Bild 69:	Regelschema elektrischer Energiespeicher zur Eigenverbrauchsoptimierung	87
Bild 70:	Energiebedarf und -erzeugung des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4 Stand Oktober 2013	89
Bild 71:	Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO ₂ -Emissionen des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4, Stand Oktober 2013	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gebäudedaten	10
Tabelle 2:	Projektbeteiligte	15
Tabelle 3:	Bilanzierungsfragen für Gebäude mit Energiegewinn	17
Tabelle 4:	wesentliche Einflussgrößen auf die Bilanzierung	21
Tabelle 5:	Primärenergiefaktoren in $\text{kWh}_{\text{pe}}/\text{kWh}_{\text{End}}$	22
Tabelle 6:	Untersuchte Varianten für die Biomethanherzeugung	24
Tabelle 7:	Treibhausgasemissionen [GEMIS]	27
Tabelle 8:	Bauteilaufbauten	30
Tabelle 9:	Anwendungen mit Hilfsenergieverbrauch (Auszug aus [Clausnitzer, Hoffmann 2009])	39
Tabelle 10:	Aufteilung des Hilfsstrombedarfs Cordierstraße 4	40
Tabelle 11:	Auszug aus dem Datenblatt des verwendeten BHKW	51
Tabelle 12:	Leistung der Photovoltaik-Anlagen	69
Tabelle 13:	Kenndaten unterschiedlicher Speicherauslegungen	83
Tabelle 14:	Energiekennwerte des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4 Stand Oktober 2013	88
Tabelle 15:	Ergebnisse der Energiebilanzen der verschiedenen Bilanzierungstools	91

1 Einleitung

In der Entwicklung hin zu energieeffizienten Gebäuden gab es in den letzten 25 Jahren rasante Fortschritte. Beginnend bei ersten Praxisexperimenten mit Niedrigenergiehäusern in den 1980er Jahren schwang auch immer die Vision mit, die Energieeinsparung so weit voranzubringen, dass die Gebäude vollständig durch regenerative Energien versorgt werden können und somit der Traum vom komfortablen Wohnen ohne schädliche Umweltauswirkungen und ohne Heizkosten verwirklicht würde. Als frühes Beispiel kann z. B. das Nullenergiehaus Dörpe genannt werden, das bereits 1989 mit diesem Anspruch zumindest für die Heizwärme errichtet wurde (Bild 1 links). Damals führten noch fehlende geeignete Komponenten und Schwierigkeiten mit der Anlagentechnik dazu, dass dieses Konzept nicht intensiv weiterverfolgt wurde. Ein anderer Ansatz war das energieautarke Solarhaus in Freiburg, das 1992 erstmals demonstrierte, dass die vollständig regenerative Versorgung von Gebäuden in Deutschland realisierbar ist, wenn auch zu sehr hohen Kosten (Bild 1 rechts).



Bild 1: Frühe Gebäude mit dem Ziel „Ausgleich von Bedarf und Erzeugung“; links: Nullenergiehaus Dörpe (1989) , rechts: energieautarkes Solarhaus, Freiburg (1992)

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

Mit dem Passivhaus wurde 1992 ein energetischer Standard erstmals in der Praxis erprobt, der eine umfassende Reduktion des Energiebedarfs ermöglichte. Das Passivhaus hat zwischenzeitlich seit 20 Jahren in vielen realisierten Gebäuden seine Funktion bei geringen Mehrkosten gegenüber normalen Neubauten erfolgreich unter Beweis gestellt. Gleichzeitig wurde die Anlagentechnik sowohl technisch als auch bei den Kosten weiterentwickelt – hier besonders die photovoltaische Stromerzeugung – so dass nun die Zeit reif ist, dem alten Traum eines Gebäudes, das mehr Energie erzeugt, als es verbraucht, einen großen Schritt näherzukommen.

Es wurden in den letzten Jahren fast mehr Definitionen und Begriffe für solche Gebäude entwickelt als tatsächlich realisierte Häuser. Bekannt sind z. B. „Plusenergiehaus“, „EffizienzhausPlus“ oder auch „Aktivhaus“. Sie alle vereint das Ziel, zumindest in der Jahresbilanz ein „Guthaben“ am Energiezähler zu erreichen.

Das Bauprojekt in der Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main, dessen Planungsphase in diesem Bericht ausführlich dokumentiert werden soll, verfolgt ebenfalls den Ansatz, in der Bilanz mehr Energie regenerativ zu erzeugen als das Gebäude verbraucht. Zur Beschreibung dieses Überschusses wird aber keiner der oben erwähnten, bekannten Begriffe verwendet, sondern es wird als **Passivhaus mit Energiegewinn** (PH+E) be-

zeichnet. Hintergrund ist, dass es aus Sicht des Bauherrn, der Planer und der Autoren von entscheidender Bedeutung ist, dass vor einer regenerativen Deckung der benötigten Energie die Minimierung des Bedarfs steht. Während beim Einfamilienhaus eine vollständig regenerative Versorgung in der Jahresbilanz mittlerweile vergleichsweise einfach möglich ist, stellt man beim Mehrfamilienhaus schnell fest, dass die zur Erzeugung zur Verfügung stehenden Flächen sehr begrenzt sind und der bilanzielle Ausgleich bei einem hohen Bedarf nicht gelingen kann. Außerdem sind auch regenerative Energien nicht in unbegrenztem Umfang verfügbar (z. B. Biomasse) oder man darf die zur Gewinnung benötigten Anlagen nicht vernachlässigen.

Aus diesem Grund bildet das Passivhauskonzept mit seinem sehr niedrigen Heizwärmebedarf die Basis für das Gebäude in der Cordierstraße. Darauf aufbauend werden auch die Warmwasserbereitung, die Wärmeverteilung und schließlich auch die elektrischen Energiebedarfe für Antriebe, Beleuchtung und den Mieterstrom minimiert. Erst danach gelingt es, den verbleibenden Energiebedarf im bzw. am Gebäude regenerativ zu decken.

Die Methodik zur Bilanzierung des Passivhauses mit Energiegewinn wird ab Kapitel 2 beschrieben. In Kapitel 3 folgen dann die Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs. Kapitel 4 bildet einen Schwerpunkt dieses Berichts, da dort die zur Energieerzeugung notwendige Anlagentechnik und ihre Randbedingungen in der Cordierstraße untersucht werden. Kapitel 5 vergleicht dann die Ergebnisse der Energiebilanzberechnungen mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren.

1.1 Kurzdarstellung des Projektes Cordierstraße 4

Das Gebäude Cordierstraße 4 ist kein Neubau auf der grünen Wiese mit optimalen städtebaulicher Randbedingungen und frei planbarer Gebäudehülle, sondern ein Ersatzneubau innerhalb eines Ensembles von ähnlichen Gebäuden, die nach dem Zweiten Weltkrieg in einfachster Bauweise und mit minderwertigem Material wiederaufgebaut wurden. Die ABG FRANKFURT HOLDING hat einige dieser Gebäude in den letzten Jahren energetisch saniert und modernisiert, dabei aber festgestellt, dass bei hohen Kosten die Sanierungsergebnisse bezüglich Grundrissen, Schall- und Brandschutz und bei der energetischen Qualität bei weitem nicht Neubaustandards entsprechen. So fiel die Entscheidung, die Gebäude Cordierstraße 2-6 (früher drei Treppenhäuser, aus diesem Grund existierten drei Hausnummern), die sich in einem besonders schlechten Zustand befanden, abzureißen und an gleicher Stelle auf der nahezu gleichen Grundfläche einen Neubau als Passivhaus mit Energiegewinn zu errichten. Dennoch soll sich dieser Neubau in das Quartier einfügen und dem besonderen Charakter der Cordierstraße 4 Rechnung tragen.

Tabelle 1: Gebäudedaten

Standort	60326 Frankfurt, Hessen
Bruttogrundfläche	1611 m ²
Bruttorauminhalt	5431 m ³
Wohnfläche (inkl. Balkone)	1237 m ²
Beheizte Wohnfläche	1170 m ²
Energiebezugsfläche (PHPP)	1219 m ²
Nutzfläche A _N	1458 m ²
A/V _e -Verhältnis	0,39 m ⁻¹
Wohneinheiten	17
Gebäudeausrichtung	West-südwest (-65° Abweichung von der Südausrichtung)

Durch die Tatsache, dass alle Gebäude der Cordierstraße ein Erdgeschoss besitzen, das um ca. 2 m gegenüber dem Straßenniveau nach unten versetzt ist, außerdem ein alter Baumbestand existiert, der erhalten werden soll, durch die Nachbarbebauung eine Verschattung des Gebäudes vorhanden ist und schließlich die Ausrichtung des Riegels sehr ungünstig für eine aktive und passive Solarenergienutzung ist, ergeben sich erschwerte Randbedingungen bei der Erreichung eines Energieüberschusses. Andererseits soll durch die erfolgreiche Umsetzung des Projektes bewiesen werden, dass ein Passivhaus mit Energieüberschuss in bestehenden Wohnsiedlungen, deren Bebauungsplan nicht unter Berücksichtigung hoher Solarenergienutzung erstellt wurde, umgesetzt werden können. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Gebäudedaten, Bild 2 zeigt die Lage des Gebäudes im Quartier.

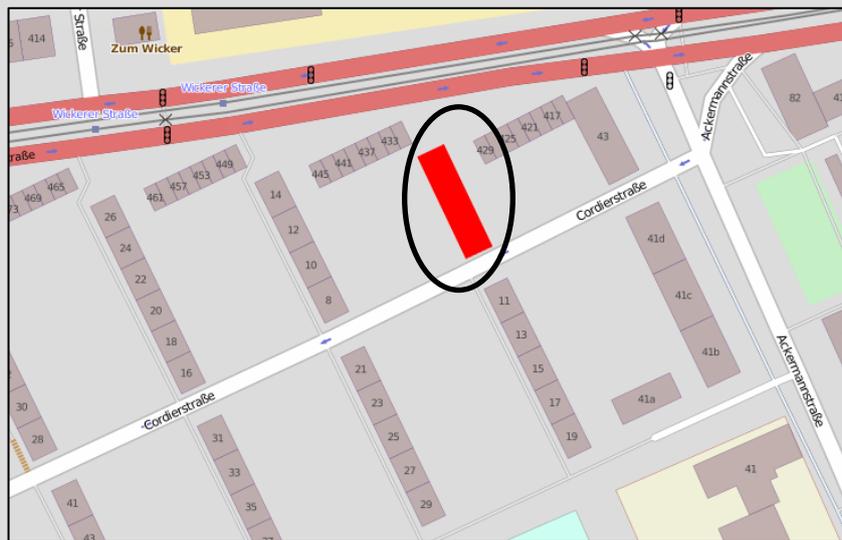


Bild 2: Lageplan des Gebäudes Cordierstraße 4 im Quartier

Quelle: Openstreetmap

Architektonisches Konzept

Die Architektur des Gebäudes vereint die Anforderungen von zeitgemäßem Wohnen, die städtebaulichen Vorgaben des fast 90-jährigen Quartiers im Frankfurter Gallusviertel und die energetischen Anforderungen des Passivhausstandards.

Großer Wert wurde auf die Diversifizierung des Wohnungsangebots gelegt, um das Gebäude für unterschiedliche Nutzergruppen attraktiv zu gestalten. Es soll Familien mit Kindern genauso ansprechen wie Single-Haushalte und Senioren. Dafür wurde eine Laubengangkonzept mit einem Treppenturm mit Aufzug gewählt, welcher nicht nur eine barrierefreie Erschließung vom Bürgersteig bis zu den Wohnungen ermöglicht, sondern bedingt durch die entstehende Halböffentlichkeit, Hausanonymität verhindert und Kommunikation fördert.

Unterschiedlichen Wohnungstypologien, wie zum Beispiel Maisonette-Wohnungen (vgl. Bild 3), die jeweils das EG mit dem 1. OG verbinden und einen eigenen kleinen Garten wie bei einem Reihenhaus besitzen oder 2-Zimmer-, 3-Zimmer- und 4-Zimmer-Etagenwohnungen im 2. bis 4. OG unterstreichen das differenzierte Angebot für unterschiedliche Nutzernachfragen (vgl. Bild 4). Weitere Grundrisse des Gebäudes sind in Anhang A dargestellt.

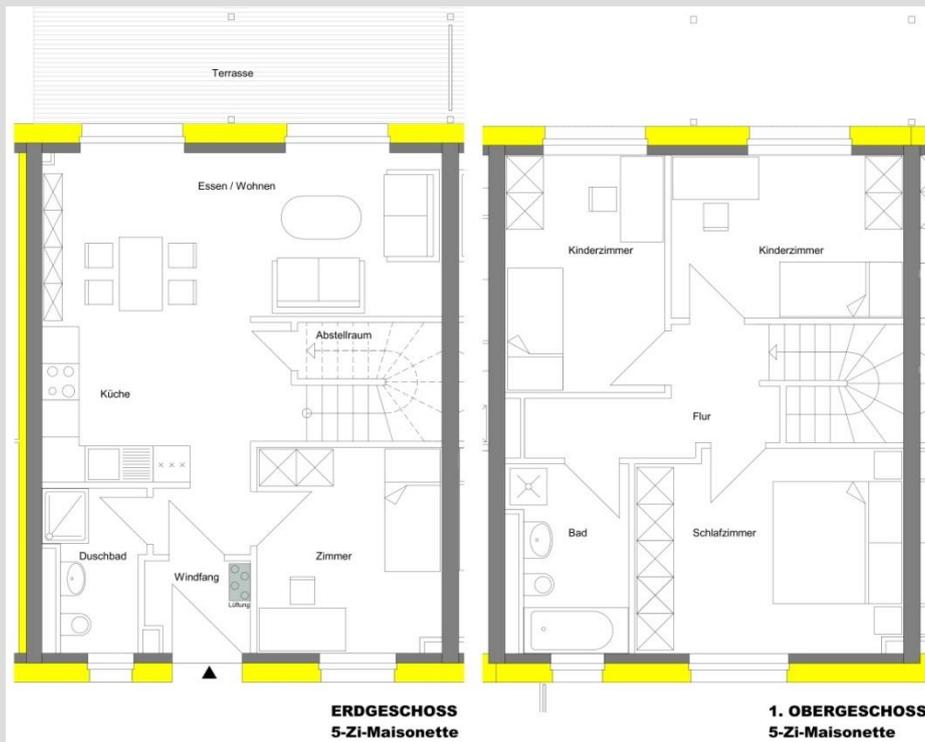


Bild 3: Grundrisse einer Maisonette-Wohnung (Quelle: faktor10)

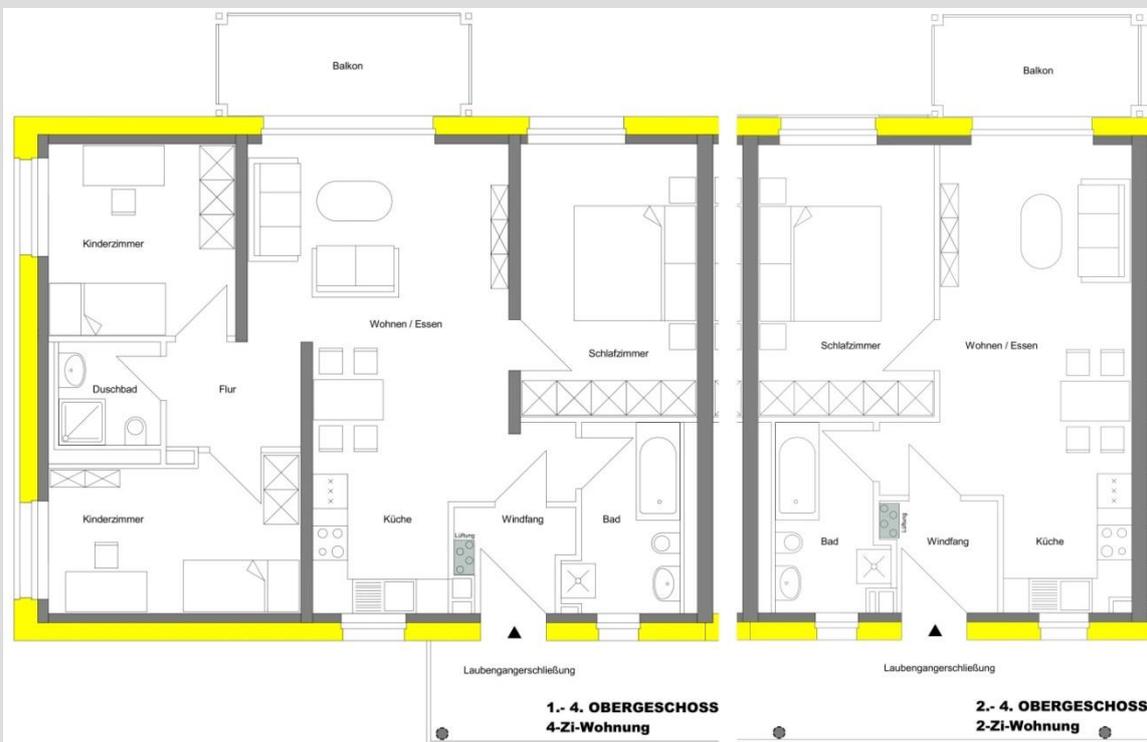


Bild 4: Grundrisse einer 4-Zimmer Wohnung und einer 2-Zimmer Wohnung (Quelle: faktor10)

Mit insgesamt 17 Wohneinheiten auf 1.237 m² Wohnfläche und höchstem energetischen Standard soll dieses Gebäude als Vorbild für eine zukunftsweisende Bauweise in der Stadt und behutsame Stadterneuerung dienen. Die Erschließung des Gebäudes über Laubengänge und das vorgestellte Treppenhaus erhöht die Kommunikation zwischen den Mietern und bietet zusätzlich energetische Vorteile (vgl. Bild 5).



Bild 5: Ansicht Ostseite, Erschließung des Gebäudes über Laubengänge (Quelle: faktor10)



Bild 6: Ansicht Westseite (Quelle: faktor10)

Die Photovoltaikanlagen auf Dach, Carport und an der Südfassade wurden in das Erscheinungsbild des Gebäudes integriert (vgl. Bild 7) und zeigen, dass das hier umgesetzte Plusenergie-Konzept gut in bestehende Quartiere passt.



Bild 7: Bestandsgebäude (links); Perspektive Südost Planungsstand Herbst 2012 (rechts) (Quelle: faktor10)

1.2 Besondere Herausforderungen

Ziel dieses Modellprojektes ist die Realisierung eines Passivhauses mit Energieüberschuss unter typischen, in Städten vorliegenden Randbedingungen. Die teilweise eher ungünstigen Randbedingungen stellen daher für die Zielerreichung des Energieüberschusses besondere Herausforderungen.

Wie zuvor beschrieben, ist eine wesentliche Herausforderung beim Mehrfamilienhaus, dass der Energiebedarf des Gebäudes aufgrund seiner kompakten Bauweise deutlich schwieriger durch solare Energieerzeugung am Gebäude zu decken ist als bei Einfamilienhäusern. Hinzu kommt in der Cordierstraße eine eher ungünstige Ausrichtung des Gebäudes nach West/Ost, die aber typisch für bestehende Stadtteile und Siedlungen ist. Erst seit wenigen Jahren sehen manche Bebauungspläne neuer Siedlungen eine auf die solare Energieerzeugung optimierte Ausrichtung der Gebäude im Bebauungsplan vor. Weitere erschwerende Randbedingungen sind bestehende Bäume, die das Gebäude verschatten und somit die solaren Wärmegevinne des Passivhauses und die solare Energieerzeugung reduzieren. Zusätzliche Anforderungen in der Baugenehmigung hinsichtlich Gestaltung des Gebäudes zur Einpassung in die Struktur des Quartiers können zur weiteren Reduzierung der solaren Erträge oder zu erhöhten Kosten für effizientere Technik führen.

Die Planungen zu dem PH+E begannen im Sommer 2010. Die Bearbeitung und Ausführung hat sich aus unterschiedlichen Gründen (z. B. dem schwierigen Baugrund) weit über ein Jahr verzögert. Während dieser Zeit gab es viele Neuerungen an technischen Möglichkeiten für Gebäude mit Energiegewinn, und auch die Anforderungen an das Projekt haben sich während des Projektzeitraumes verändert. Dies hat die Planung und Umsetzung des Projektes wesentlich beeinflusst. In diesem Projektbericht wird hauptsächlich der Planungsstand zum Zeitpunkt Herbst 2012, kurz vor Baubeginn, als wesentliche Entscheidungen getroffen wurden, dargestellt sowie die Untersuchungen, die zu diesem Planungsstand geführt haben. Im Anschluss werden die Ergebnisse der endgültigen Ausführungsplanung und bisherigen Umsetzung (Stand Oktober 2013) dargestellt. Die Baufertigstellung ist für Ende 2013 geplant.

1.3 Projektdurchführung

Zur Umsetzung eines solch innovativen Bauvorhabens ist einerseits ein Bauherr erforderlich, der bereit ist, bisher gewohnte Abläufe und Standards zu verlassen und neue Wege zu beschreiten. Die ABG FRANKFURT HOLDING als Eigentümer und Bauherr in der Cordierstraße 4 hat bereits bei zahlreichen Neubau- und Modernisierungsvorhaben unter Beweis gestellt, dass sie innovative Projekte erfolgreich umsetzen kann. Dazu kommen in der Cordierstraße 4 spezialisierte Büros für Architektur und Bauleitung (Büro faktor10 in Darmstadt), Heizung, Lüftung, Sanitär (ibs Energie, Stromberg), Elektro (Steinigeweg und Partner, Darmstadt) und Schallschutz (ITA, Wiesbaden) sowie weitere Beteiligte. Tabelle 2 zeigt die Liste der Projektbeteiligten und der Förderungen.

Tabelle 2: Projektbeteiligte

Eigentümer und Bauherr	ABG FRANKFURT HOLDING GmbH, Frankfurt
Architektur, Detailplanung, Bauleitung	faktor10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH, Darmstadt
Tragwerksplanung, Brandschutz	bauart Konstruktions GmbH & Co. KG, Lauterbach
Heizung-, Lüftung-, Sanitärplanung	ibs Energie - Ingenieurbüro Ulrich Schäfer, Stromberg
Elektroplanung	Steinigeweg und Partner, Darmstadt
Schallschutz	ITA Ingenieurgesellschaft für technische Akustik mbH, Wiesbaden
Wissenschaftliche Begleitung Planungsphase	Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt
Förderung der Begleitforschung	Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Förderung im Modellvorhaben „Auf dem Weg zum EffizienzhausPlus“	Deutsche Energieagentur (dena), Berlin
Förderung Monitoring und innovative Anlagentechnik im Modellvorhaben „EffizienzhausPlus“	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin

Wissenschaftliche Begleitung und Förderung des Bauvorhabens

Das Institut Wohnen und Umwelt übernimmt die wissenschaftliche Begleitung des Projektes in der Planungsphase, die mit diesem Bericht dokumentiert wird. Diese wissenschaftliche Begleitung wird vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz gefördert. Die Förderung des Landes Hessen geht über die Begleitung der Planungsphase der Cordierstraße 4 als Passivhaus mit Energiegewinn hinaus. In einer zweiten Projektphase werden die Erfahrungen aus dem Bauvorhaben in der Cordierstraße 4 in ein übertragbares Konzept „Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E)“ überführt. Im Rahmen dieses Projektberichtes werden übergreifende Fragestellungen daher nur am Rande behandelt und teilweise auf den folgenden Projektbericht verwiesen.

Der Bauherr erhält für das Projekt Cordierstraße 4 eine Förderung von der dena im Rahmen der dena-Modellvorhaben „Auf dem Weg zum EffizienzhausPlus“.

Im Anschluss an die Bauphase wird das Gebäude in der Cordierstraße 4 nach Bezug in einem Monitoring detailliert über zwei Jahre vermessen. Auf dieser Basis erfolgt die messtechnische Erfolgskontrolle und es werden Betriebsoptimierungen durchgeführt. Dies findet im Rahmen des Forschungsprogrammes des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung für Modellprojekte im Effizienzhaus Plus-Standard statt. Im Rahmen des Abschlussberichts sollen auch die Kosten des Projekts dokumentiert werden.

Danksagung

Die Autoren möchten sich ausdrücklich für die Förderung der Begleitforschung beim Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz bedanken.

Für die gute Zusammenarbeit im Projekt gilt der Dank der ABG FRANKFURT HOLDING, insbesondere Herrn Wagner und Herrn Theobald, außerdem Herrn Rasch und Frau Grenz vom Büro faktor10, Herrn Wust vom Ingenieurbüro ibs Energie und Herrn Pfitzer von Ingenieurbüro Steinigeweg und Partner.

2 Das Passivhaus mit Energiegewinn

In diesem Kapitel wird zuerst kurz die hier verwendete Definition des Passivhauses mit Energiegewinn (PH+E) vorgestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung der Definition des Passivhauses mit Energiegewinn und der darüber hinausgehenden wichtigen Randbedingungen, die zusätzlich beachtet werden sollten, ist im übergreifenden Bericht zum Projekt „Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn¹“ enthalten. Im Anschluss werden die verwendeten Bilanzierungswerkzeuge dargestellt. Darauf aufbauend wird kurz der Weg zum Energieüberschuss auf Basis der zuvor vorgestellten Definition erläutert.

2.1 Definition Passivhaus mit Energiegewinn (PH + E)

2.1.1 Gebäude mit Energieüberschuss

Zielvorstellung eines Hauses in der Zukunft wäre, dass der Verbrauch vollständig und simultan mit regenerativen Energien ohne schädliche Umweltauswirkungen gedeckt wird. Dies ist jedoch auf absehbare Zeit ein weder sinnvoller noch finanziell tragfähiger Ansatz. Bisherige Gebäude, die mit dem Ziel eines Energiegewinns errichtet wurden, erreichen diesen bei Beachtung unterschiedlicher Randbedingungen bzw. Vereinfachungen. So gibt es Gebäude, die den benötigten Wärmeenergiebedarf in der Jahresbilanz auf null reduzieren, Gebäude die zusätzlich Teile des elektrischen Energiebedarfs (Hilfsstrom, Beleuchtung) oder sogar den gesamten elektrischen Energiebedarf in der Bilanz berücksichtigen oder Gebäude, die einen bilanziellen Energieüberschuss durch die Anrechnung von Ökostrom erhalten. Dabei wird teilweise das elektrische Netz als (jahres-)zeitlicher Energiespeicher angesehen.

Alle diese Gebäude haben Bezeichnungen, die ein Plus an Energie vermuten lassen, eine einheitliche Definition gibt es jedoch bisher nicht. Definitionsbedarf für Gebäude mit Energiegewinn besteht in den in Tabelle 3 dargestellten Bereichen.

Tabelle 3: Bilanzierungsfragen für Gebäude mit Energiegewinn

Energetischer Standard des Gebäudes	Welcher energetische Gebäudestandard sollte einem Gebäude mit Energiegewinn zugrunde gelegt werden?
Netzkopplung:	Handelt es sich um ein energieautarkes Gebäude oder ein Gebäude, das netzgekoppelt ist und das elektrische Netz als „Stromspeicher“ bzw. als zeitlichen Ausgleich nutzt und somit nur bilanziell einen Energiegewinn erzielt?
Bilanzsystem:	Erfolgt die Bilanzierung der Energie auf Grundlage von Kennwerten zur Primärenergie, Endenergie, Emissionen, Exergie oder sogar Kosten?
Bilanzgrenzen:	<p>Energiebedarf: Wird nur der Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser und der Hilfsenergiebedarf bilanziert (Bilanzumfang EnEV) oder der gesamte Energiebedarf einschließlich des individuellen Strombedarfs des Gebäudenutzers? Wird gegebenenfalls sogar Energie für Mobilität oder die Erstellung und den Rückbau des Gebäudes mit betrachtet?</p> <p>Energieerzeugung: Wird lediglich die solar am Gebäude erzeugte Energie zugeordnet oder auch die durch ein BHKW erzeugte Energie (Import regenerativer Energie) oder sogar der Bezug von Ökostrom?</p> <p>Kompensation: Können unvermeidbare Verbräuche durch Gutschriften von anderen Energieträgern kompensiert werden?</p>

¹ „Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E)“, IWU, Dezember 2013

Bilanzperiode:	Auf welchen Bezugszeitraum sollte die Bilanz ausgeglichen sein? Monatlich, jährlich, über die Lebensdauer des Gebäudes?
Energiequelle:	Sollten Gebäude mit Energiegewinn durch ausschließlich regenerative Energieträger betrachtet werden oder ist auch ein Einsatz fossiler Energieträger denkbar?
Zusätzliche Randbedingungen:	Wie viel Biomasse darf in einem solchen Gebäude verwendet werden?

2.1.2 Passivhaus mit Energiegewinn (PH+E)

Das IWU hat aus diesen Fragen zur Bilanzierung die Definition eines Passivhauses mit Energiegewinn abgeleitet (eine ausführliche Diskussion der Fragen ist im Endbericht „Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E)“¹ enthalten).

Bei einem Passivhaus mit Energiegewinn handelt es sich um ein **hocheffizientes Gebäude**, das nur einen sehr geringen Energiebedarf für Wärme und Strom besitzt. Basis ist für den Neubau der Passivhausstandard mit einem Heizwärmebedarf von lediglich 15 kWh/(m²a), für Bestandsgebäude wird eine Sanierung mit Passivhauskomponenten auf den EnerPHit-Standards (Zielwert 25 kWh/m²a) des Passivhaus Instituts (vgl. [PHI 2013]) angestrebt.

Das Gebäude ist an das **elektrische Netz gekoppelt**, auf diese Weise kann der per Definition des Energiegewinns entstehende Überschuss an erzeugter Energie eingespeist werden. Zusätzlich arbeiten die elektrischen Energieerzeugungsanlagen bei Netzanschluss effizienter bzw. die gesamte erzeugte Energie kann genutzt werden, denn bei einem energieautarken Gebäude müssten die Energieerzeugungsanlagen überdimensioniert werden und würden daher weniger effizient arbeiten und zusätzliche Kosten verursachen. Daher scheint die Errichtung eines energieautarken Gebäudes innerhalb von Städten und Siedlungen nicht zielführend. Trotz Netzanschluss des Gebäudes sollte jedoch die Belastung der elektrischen Netze durch das Gebäude reduziert werden, d. h. dass einerseits Lastspitzen als kurzfristige Auswirkungen, aber auch langfristige Auswirkungen wie die Nutzung des elektrischen Netzes als saisonaler Speicher möglichst reduziert werden.

Als Bilanzsystem wird die **primärenergetische Bilanzierung** angewendet. Die Bewertung auf Basis von Endenergie ist für den Fall, dass ein Gebäude verschiedene Energieträger nutzt, schwierig, diese werden erst durch die Umrechnung mit Primärenergiefaktoren vergleichbar. Wichtig hierfür ist die verlässliche Definition von Primärenergie- und/oder Emissionsfaktoren verschiedener Energien, hierzu werden Primärenergiefaktoren nach GEMIS (vgl. [GEMIS 2013]) verwendet, die Berücksichtigung eines Verdrängungsstrommixes, wie er in der DIN V 18599 vorgenommen wird, findet nicht statt. Gutschriften als zeitlicher Ausgleich oder zwischen Energieträgern sind vorerst zugelassen. Die Betrachtung weiterer Kennzahlen zusätzlich zur Primärenergie (z. B. Endenergie, Treibhausgas-Emissionen, Biomassenutzung) verbessert die Beschreibung der energetischen Qualität. Allerdings ist es möglich, dass ein Gebäude nicht in allen Bewertungen ein optimales Ergebnis erreicht.

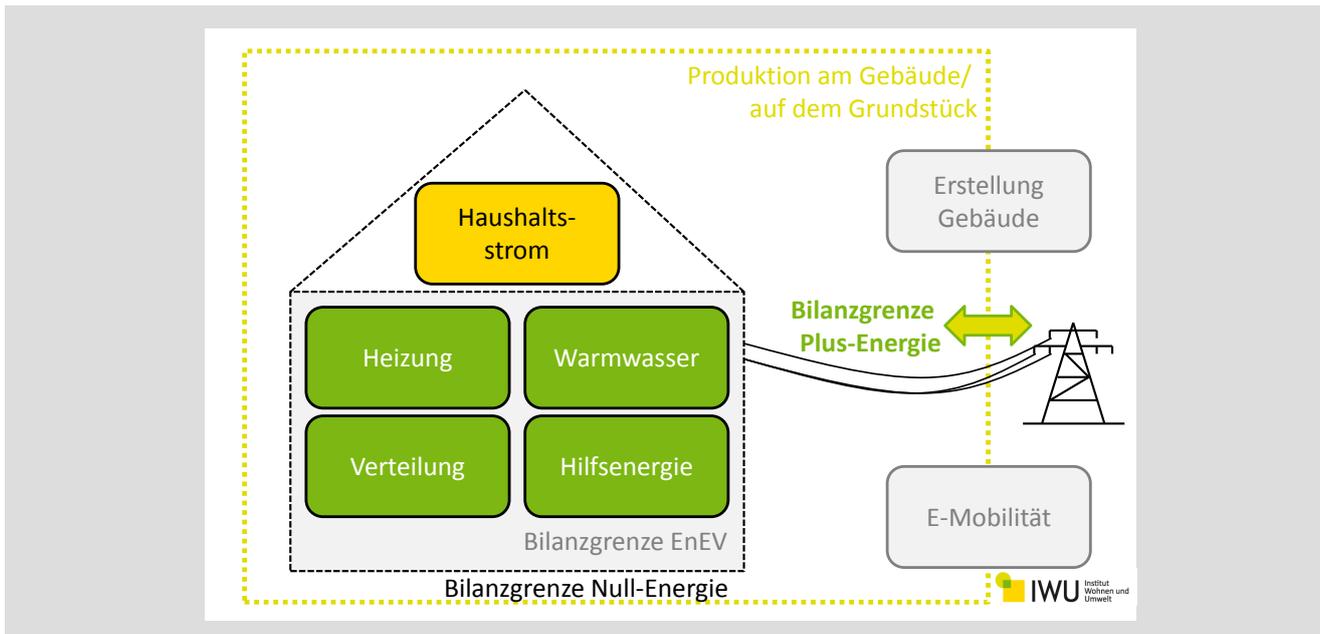


Bild 8: Bilanzgrenzen

Quelle: IWU

Als **Bilanzgrenzen** werden für den Energiebedarf der gesamte im Gebäude benötigte Energiebedarf für Wärme und elektrische Energie einbezogen, nicht jedoch die Energie für Mobilität und den Herstellungsenergieaufwand des Gebäudes. Die Bilanzgrenze der Energieerzeugung bezieht sich auf die gesamte im und am Gebäude erzeugte Energie, Bilanzgrenze ist hier das gesamte zum Gebäude gehörende Grundstück, Lieferungen von regenerativer Energie sind möglich. Bei einer (Nahwärme-)Versorgung mit einem BHKW wird die im Rahmen der Wärmeerzeugung für das Gebäude entstehende elektrische Energie in die Energiebilanz des Gebäudes mit einbezogen.

Die **Bilanzperiode** erstreckt sich über ein Jahr, Ziel sollte jedoch der monatliche Ausgleich sein. Als **Energiequellen** nutzt das Passivhaus mit Energiegewinn ausschließlich regenerative Energieträger. Darunter fallen z. B. die solare Energieerzeugung durch solarthermische Anlagen und Photovoltaikanlagen, die Nutzung von Windenergie in der Nähe des Gebäudes und der Einsatz von Biomasse. Bei Nutzung von Biomasse müssen jedoch zusätzliche Randbedingungen eingehalten werden: die Nutzung von Biomasse muss auf möglichst niedrigem Niveau gehalten werden, die Biomasse muss mit hoher Effizienz z. B. in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen verwendet werden, Umweltauswirkungen müssen weitestgehend reduziert werden und das **Biomasse-Potenzial** von maximal $35 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (vgl. [Diefenbach 2002]) muss eingehalten werden. Weiterhin sollte die bezogene Biomasse nachhaltig erzeugt werden und möglichst geringe Transportwege vorweisen, dies wird bei der Bewertung im Primärenergiefaktor berücksichtigt. Der Einsatz von Biomasse in einem Passivhaus mit Energiegewinn ist unter diesen Randbedingungen zielführend, da die Biomasse so effizient wie möglich genutzt wird. Unter diesem Aspekt ist es auch vertretbar, wenn die Biomasse aus dem Umland bezogen wird – dies ist nicht anders zu bewerten als ein Gebäude, das seine Energie zeitweise aus dem elektrischen Netz z. B. für die Nutzung einer Wärmepumpe bezieht.

2.2 Bilanzierungswerkzeuge

Die Energiebilanz des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4 wird innerhalb dieses Berichtes mit dem Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP Version 7.1) dargestellt. Eine Bilanzierung nach EnEV 2009 in Verbindung mit der DIN V 18599 wurde für das Gebäude auch durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Bilanz nach den Rahmenbedingungen des BMVBS für Gebäude im Effizienzhaus Plus-Standard angefertigt. Die wesentlichen Unterschiede in der Bilanzierung werden hier kurz angesprochen.

Ausschlaggebend für die Primärenergiebilanz des Gebäudes sind die angesetzten Primärenergiefaktoren für verschiedene Energieträger. Für diese Untersuchung werden anhand von GEMIS 4.8.1 (vgl. [GEMIS 2013]) berechnete Primärenergiefaktoren genutzt. In diesem Kapitel werden diese mit den Faktoren der EnEV 2009 und der DIN V 18599 verglichen und die wesentlichen Unterschiede diskutiert.

2.2.1 Passivhaus Projektierungs-Paket vs. EnEV2009/DIN V 18599

Das Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP) eignet sich besonders gut für detaillierte Untersuchungen zur Energiebilanz, da das betrachtete Gebäude mit seiner Gebäudehülle, Anlagentechnik und auch elektrischem Energieverbrauch sehr detailliert abgebildet werden kann. Gerade der elektrische Energieverbrauch für Haushaltsstrom ist für das Passivhaus mit Energiegewinn eine wichtige Kenngröße, die in die Energiebilanz mit einfließt. Bestehende Projekte (vgl. [Großklos 2013]) zeigen bei nachträglicher messtechnischer Erfolgskontrolle, dass nach Anpassung der Rahmenbedingung innerhalb des PHPPs (z. B. Außenklima, Innentemperatur, Warmwasserverbrauch, ggf. interne Wärmequellen) die Messwerte sehr gut mit den berechneten Energiekennwerten übereinstimmen. Auch dies spricht für die Bilanzierung des Gebäudes mit dem PHPP zur detaillierten Untersuchung der Effekte einzelner Maßnahmen. Die Erfahrungen aus der Praxis haben weiterhin gezeigt, dass die tatsächlichen im Gebäude vorliegenden Randbedingungen häufig von den zur Bilanzierung getroffenen Annahmen abweichen. Z. B. haben die Nutzer häufig einen hohen Komfortanspruch, so dass sich typischerweise in den Gebäuden eine Raumtemperatur von 21-23 °C einstellt (vgl. [Großklos 2013]). Auf die Anlagentechnik und die Energiebilanz des Passivhauses mit Energiegewinn können solche Randbedingungen große Auswirkungen haben. Daher wurde dies in der Planungsphase des Gebäudes in der Cordierstraße 4 bei der Auslegung der Anlagentechnik berücksichtigt und soll hier teilweise in Parametervariationen dargestellt werden, um die Energiebilanz des Gebäudes unter bewohnten Randbedingungen abschätzen zu können; auch dies ist mit dem PHPP möglich.

Wesentliche Unterschiede zwischen dem PHPP und der Bilanzierung nach EnEV 2009 bestehen bei der Bezugsfläche für den Energiebedarf und den berücksichtigten internen Wärmequellen. So ergibt sich für die Bilanz nach EnEV2009 eine 16 % größere Nutzfläche A_N als die Energiebezugsfläche des PHPP, die den Energiebedarf pro m^2a in der Bilanz nach EnEV entsprechend reduziert. Die internen Wärmequellen werden für die EnEV-Bilanz nach DIN V 18599-10 mit dem doppelten Wert des PHPP angesetzt, bei gleichzeitig größerer Nutzfläche. Auch dies reduziert den Energiebedarf des Gebäudes in der Bilanz nach EnEV 2009/DIN V 18599 im Vergleich zum Passivhaus erheblich. Diese Unterschiede und weitere wesentliche Einflussgrößen sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: wesentliche Einflussgrößen auf die Bilanzierung

	PHPP	EnEV 2009 (DIN V 18599)
Bezugsfläche	Energiebezugsfläche (EBF) 1219 m ²	Nutzfläche A _N 1458 m ²
Interne Wärmequellen	2,1 W/m ² _{EBF}	4,2 W/m ² _{AN} (100 Wh/(m ² d) Nutzungsprofil gemäß DIN V 18599-10 Wohngebäude Mehrfa- milienhaus)
Innentemperatur	20 °C	20 °C
Nutzwärmebedarf Warmwasser	16,6 kWh/m ² _{EBF} (berechnet nach Belegungsdichte, 25 l/Person)	16 kWh/m ² _{beheizte WF} (Pauschale)

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bilanzierung ist die Hinterlegung der in einem Passivhaus mit Energiegewinn aufwändigeren Anlagentechnik zur Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser. In dem Projekt Cordierstraße 4 werden hierzu verschiedene Effizienztechniken eingesetzt: große Pufferspeicher, erwärmt durch eine solarthermische Anlage in Kombination mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW), stellen die Wärme für Warmwasser und Heizung bereit. Die Warmwasserbereitung erfolgt über eine Frischwasserstation auf verringertem Temperaturniveau von 48 °C. Dies ist in beiden Bilanzierungsprogrammen nicht optimal abbildbar, lässt sich jedoch im PHPP deutlich besser hinterlegen, hierzu wurden teilweise zusätzliche Berechnungen durchgeführt.

Weiterhin wird bei der Bilanz der Cordierstraße 4 nach EnEV 2009 in Verbindung mit der DIN V 18599 die Stromproduktion des dezentralen BHKWs unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren als Abzug vom Endenergiebedarf des Wärmeerzeugers berücksichtigt (gem. DIN V 18599 Teil 9). Dadurch wird jedoch auch die primärenergetische Bilanz stark beeinflusst. Die Energiekennwerte dieser Bilanz sind schließlich aus diesem Grund und wegen der vorangehenden Anwendung eines Primärenergiefaktors für den Verdrängungsstrommix in der Bilanzierung nach DIN V 18599 schwierig vergleichbar. Das Ergebnis der unterschiedlichen Bilanzierungen ist in Kapitel 5.2 dargestellt, das Gebäude in der Cordierstraße 4 erreicht die Zielwertanforderungen beider Bilanzierungsverfahren mit sehr gutem Ergebnis.

2.2.2 Primärenergiefaktoren nach GEMIS vs. DIN V 18599 und EnEV 2009

Primärenergiefaktoren bzw. die kumulierten Energieverbräuche (KEV) sind abhängig vom verwendeten Energieträger und den entsprechenden Vorketten bis zur Nutzung. Diese können sich auch beim gleichen Energieträger, abhängig von den angenommenen Vorketten (z. B. kurze Transportwege durch Gewinnung vor Ort oder langer Transport aus dem Ausland), sehr unterschiedlich gestalten, wie Berechnungen mit GEMIS zeigen.

Besonders starke Auswirkungen auf die Bilanz hat der Primärenergiefaktor des Strommixes in Deutschland, der zum einen innerhalb der letzten Jahre aufgrund des verstärkten Anteils erneuerbarer Energien gesunken ist und zum anderen innerhalb des Jahres bei detaillierter Betrachtung auch gewissen Schwankungen unterliegt (vgl. [Großklos, Frank 2013]). Im Folgenden wird jedoch nur mit im Jahresverlauf konstanten Bewertungsfaktoren gerechnet.

Die langfristige Veränderung von Primärenergiefaktoren hat darüber hinaus den Effekt, dass ein Gebäude mit Energieüberschuss nach aktueller Bilanzierung eventuell in einigen Jahren aufgrund anderer Primärenergiefaktoren der bezogenen und eingespeisten Energie bilanziell keinen Energieüberschuss mehr erwirtschaftet. Dies unterstreicht die Wichtigkeit, zuerst eine größtmögliche Verbrauchsreduktion zu erreichen, bevor Gutschriften angerechnet werden.

Aufgrund Ihres großen Einflusses auf das primärenergetische Ergebnis der Energiebilanz werden die verschiedenen verwendeten Primärenergiefaktoren hier dargestellt und diskutiert. Betrachtet wird hierzu nur der nicht erneuerbare Anteil des kumulierten Energieaufwandes. Tabelle 5 zeigt die verschiedenen, mit GEMIS berechneten Primärenergiefaktoren im Vergleich zu den in der DIN V 18599 angesetzten Werten, die für die Bilanz nach den Randbedingungen für Wohngebäude als Effizienzhaus Plus verwendet werden und den nach EnEV 2009 zu berücksichtigenden Werten.

Tabelle 5: Primärenergiefaktoren in kWh_{pe}/kWh_{End}

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

Bei Vergleich der in Tabelle 5 dargestellte Werte ergeben sich große Unterschiede zwischen den verschiedenen Quellen. Ursachen sind unter anderem politische Zielsetzungen aber auch, dass sich die Datengrundlage der Berechnungen und Annahmen recht schnell verändert.

Bewertung von elektrischem Strom

Dies zeigt sich insbesondere in dem Primärenergiefaktor des Strommixes in Deutschland, der in den letzten Jahren stark gesunken ist und daher in den aktuellen Berechnungen mit GEMIS geringer ausfällt als in der zur Planungsphase gültigen EnEV 2009 berücksichtigt. Die DIN V 18599 vom Dezember 2011 wurde im Mai 2013 dahingehend novelliert, dass der nicht regenerative Primärenergiefaktor um 17 % von 2,4 auf 2,0 reduziert wurde. Zusätzlich wurde bereits 2011 ein Faktor für den Verdrängungsstrommix eingeführt, der den Mix fossiler Kraftwerke im Mittellastbereich abbilden soll und für die Anrechnung von Primärenergiegutschriften durch eingespeisten Strom angewendet werden darf. Durch diese differenzierte Gutschrift wird durch regenerative Anlagen erzeugter und eingespeister Strom besser bewertet als bezogener Strom aus dem elektrischen Netz.

Diese Gutschrift bewirkt, dass die Stromerzeugung am Gebäude aufgrund der höheren Gutschrift attraktiver wird. Weitere Konsequenz ist, dass ein Gebäude auf Plus-Energie Niveau bei der Bilanzierung mit diesen Faktoren in der Bilanz langfristig einen Primärenergieüberschuss erzielt, solange der Primärenergiefaktor des Verdrängungsstrommixes höher angesetzt ist als der Bezugsstrom. Nachteil dieser differenzierten Bewertung ist jedoch, dass bei Berücksichtigung des Anteils selbst verbrauchten Stromes am insgesamt selbst erzeugten Strom, wie es in der Bilanzierung als Effizienzhaus Plus des BMVBS für Wohngebäude festgelegt ist, der Verbrauch des selbst erzeugten Stromes im Gebäude weniger interessant ist als die Netzeinspeisung und somit das elektrische Netz stärker belastet wird.

Grundlegend stellt sich natürlich die Frage, ob die große Differenz (vgl. Bild 9) zwischen dem Verdrängungstrommix und dem immer weiter sinkenden Primärenergiefaktor des deutschen Strommixes langfristig zielführend ist. Die Autoren setzen daher für die Bilanzierung des Gebäudes in der Cordierstraße 4 für den Bezug und die Einspeisung von elektrischer Energie den gleichen Primärenergiefaktor an.

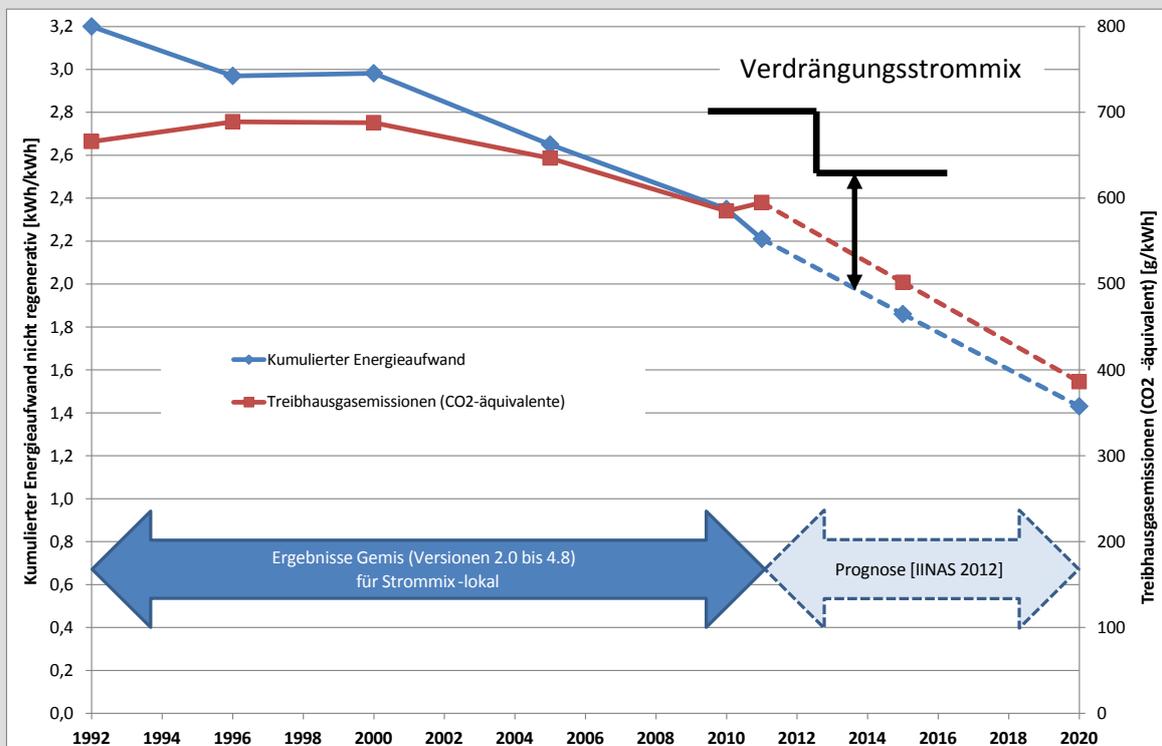


Bild 9: Entwicklung und Prognose kumulierter Energieaufwand nicht regenerativ für den deutschen Strommix

Große Abweichungen bestehen auch bei den angesetzten Primärenergiefaktoren für die Erzeugung elektrischer Energie mit **Photovoltaikanlagen**. Während nach DIN V 18599 und bei Berücksichtigung nach EnEV 2009 (§5) ein Primärenergiefaktor von 0 kWh/kWh angesetzt wird, ergeben sich bei der Berechnung mit GEMIS Werte von ca. 0,40 kWh/kWh für eine übliche Anlage mit geringem Materialeinsatz für die Aufständigung und typischem Wechselrichter. In [Quaschnig 2011] sind Studien zum Herstellungsenergieaufwand von Photovoltaikanlagen zitiert, die teilweise zu noch höheren Primärenergiefaktoren führen. Die Tatsache, dass der kumulierte Energieverbrauch montierter Photovoltaik-Anlagen im Bereich von 40 % bis 50 % der produzierten Endenergie liegt, bedeutet, dass es langfristig nicht zielführend ist den Primärenergiefaktor von Photovoltaikanlagen zu vernachlässigen, auch wenn eine erhöhte Erzeugung von elektrischer Energie durch Photovoltaik erwünscht ist und gefördert werden soll. Aus diesem Grund ist Grundlage der Betrachtungen in diesem Bericht ein Primärenergiefaktor von 0,4 kWh/kWh für die Photovoltaikanlage in der Cordierstraße 4.

Bewertung von Biomethan

Für die Bewertung von Biomethan werden in unterschiedlichen Quellen, wie Tabelle 5 zeigt, sehr unterschiedliche Faktoren angegeben. Hintergründe sind z. T. Sicherheitszuschläge oder die Einordnung von Biomethan als Erdgas, um beim öffentlich-rechtlichen Nachweis nicht für das einzelne Gebäude durch einen schnell zu ändernden Vertrag über die Lieferung von Biomethan anstelle von Erdgas schlechtere energeti-

sche Standards am Gebäude zuzulassen. Die Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung zeigt jedoch, dass auch durch an anderer Stelle eingespeiste Energie nennenswerte Veränderungen in der Energieträgerstruktur erreicht werden können. Aus diesem Grund wird Biomethan, wenn es nachhaltig erzeugt wird, als sinnvoller regenerativer Energieträger für Gebäude mit Energieüberschuss angesehen, auch wenn physikalisch/chemisch lokal das erzeugte Biomethan nicht ankommt.

Um die Umweltauswirkungen ohne die ordnungsrechtlichen Aspekte bewerten zu können, wurden mit dem Programm GEMIS verschiedene Varianten der Biomethanherzeugung verglichen. Basis bildeten Standard-Prozesse aus GEMIS für die Biomethanherzeugung und die Gasaufbereitung. Die Bilanzierung umfasst den Anbau der Substrate (inkl. Düngemittel), die Fermentation, die Biogasaufbereitung, die Einspeisung in das Erdgas-Netz, den Transport sowie den Materialaufwand einer Biomethan-Therme zur Berücksichtigung einer Umwandlungsanlage im Gebäude. Im Gebäude sind jedoch keine Umwandlungsverluste und kein Hilfsenergieeinsatz berücksichtigt, da diese im PHPP bzw. der EnEV separat bestimmt werden.

Exemplarisch ist in Bild 10 die Prozesskette für Biomethan aus Mais unter Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen in Deutschland dargestellt.

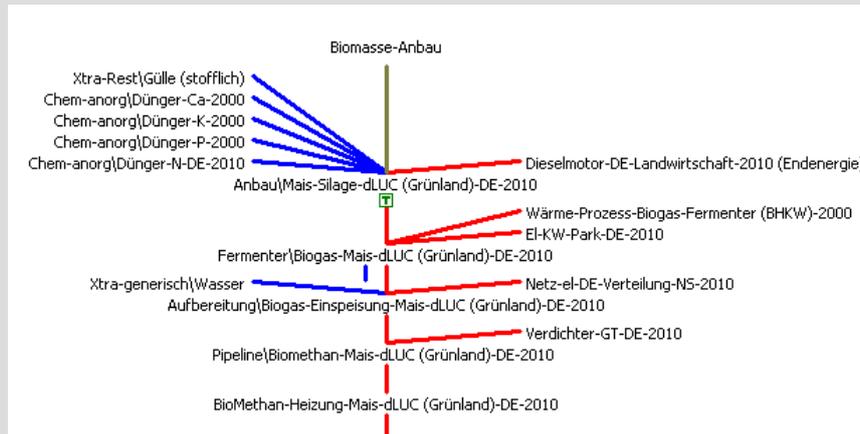


Bild 10: Prozesskette für „Biomethan aus Mais dLUC“ [GEMIS]

Folgende unterschiedliche Prozesse wurden betrachtet, die Gasaufbereitung erfolgt, wenn nicht anders erwähnt, mit Druckwasserwäsche (siehe Tabelle 6):

Tabelle 6: Untersuchte Varianten für die Biomethanherzeugung

Name	Erläuterung
Biomethan aus Gülle	Erzeugung aus einem Mix aus Rinder- und Schweinegülle sowie Hühnerkot
Biomethan aus Biomüll	Erzeugung aus Biomüll aus getrennter Hausmüllsammlung
Biomethan aus Gras-Silage	Erzeugung mit Gras-Silage aus Dauergrünland
Biomethan aus Mais 0LUC	Konventioneller Maisanbau auf Stilllegungsflächen, d. h. ohne Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen (0LUC)
Biomethan aus Mais dLUC	Konventioneller Maisanbau auf Stilllegungsflächen aber mit Berücksichtigung von CO ₂ -Emissionen durch direkte Landnutzungsänderungen (dLUC)

Biomethan aus Mais dLUC Aminwäsche	Konventioneller Maisanbau auf Stilllegungsflächen aber mit Berücksichtigung von CO ₂ -Emissionen durch direkte Landnutzungsänderungen (dLUC), Gasaufbereitung Aminwäsche (einfache Abschätzung)
Biomethan aus Mais iLUC (50 % Acker)	Anbau von Silomais als Energiepflanze inkl. Emissionen aus direkter Landnutzungsänderung sowie indirekte Effekte bezogen auf Ackerland (iLUC)
Biomethan aus Mais iLUC (50 % Grünland)	Anbau von Silomais als Energiepflanze inkl. Emissionen aus direkter Landnutzungsänderung sowie indirekte Effekte bezogen auf Grünland (iLUC)
Referenz: Erdgas	Referenzwerte für eine Versorgung mit Erdgas

Erläuterungen zu den Landnutzungsänderungen

Werden Abfallstoffe für die Biogaserzeugung verwendet, so sind nur geringe direkte und keine indirekten Landnutzungsänderungen zu erwarten (0LUC). Hierzu zählen die Vergärung von reiner Gülle (hier ergeben sich durch das Vermindern von unkontrollierter Ausgasung sogar positive Effekte) und getrennt gesammelten Haushaltsabfällen (Biomüll). Gleiches gilt für leicht degradierte Flächen und verlassenes Ackerland. Ggf. kann hier auch die Biogaserzeugung aus Industriereststoffen mit hinzugerechnet werden, wenn die Stoffe sonst entsorgt werden müssten. Diese Substrate sind bei der Biogaserzeugung zu bevorzugen.

Werden Substrate extra für die Biogaserzeugung angebaut, so ist immer mit direkten Landnutzungsänderungen (dLUC) zu rechnen, wenn z. B. Brachland in intensiv genutztes Land umgewandelt wird.

Wird Ackerland für die Energiepflanzenproduktion umgenutzt, so ist immer auch von zusätzlichen indirekten Landnutzungsänderungen auszugehen (iLUC), da die verdrängten Produkte an anderer Stelle erzeugt werden müssen. Dabei ist zu unterscheiden, ob zusätzlich Grünland für den Ackerbau umgebrochen wird, was mit höheren Treibhausgasemissionen verbunden ist oder die Verdrängung auf Ackerland stattfindet.

Fazit für die Wahl der Substrate: Der Anbau sollte – wenn nicht ausreichend Reststoffe zur Verfügung stehen – nachhaltig erfolgen, d. h. vielfältige Fruchtfolgen, minimierter Einsatz von Agrochemikalien, Pufferzonen und Korridore für die Tier- und Pflanzenwelt müssen erhalten werden [Öko 2008a]. Dabei sind stillgelegte Ackerflächen der Verdrängung von Nahrungsmittelproduktion klar vorzuziehen. Wird zu viel Ackerland für die Substratproduktion umgenutzt, können die Ergebnisse aus Sicht des Klimaschutzes gegenüber fossilen Energieträgern kontraproduktiv sein.

Über die Folgen der Landnutzungsänderung laufen international mehrere Forschungsvorhaben (mit dem Schwerpunkt der Biokraftstoffproduktion), eine abschließende Bewertung scheint noch nicht gefunden.

Ergebnisse

Betrachtet man den kumulierten Energieverbrauch für Biomethan (Bild 11 links), so zeigt sich, dass die KEV-Werte zwischen 0,17 kWh/kWh und 0,34 kWh/kWh liegen. Als Referenz ist zusätzlich der Wert für (fossiles) Erdgas dargestellt. In der Abbildung sind diejenigen Erzeugungsarten von Biomethan grün markiert, die für den Einsatz in der Cordierstraße 4 realistisch in Frage kommen. Einerseits Biomethan aus Gras-Silage, Biomethan aus Mais auf Brachflächen (dLUC) und Biomethan aus Mais bei Verdrängung anderer Anbauerzeugnisse (iLUC). Zusätzlich wurde versucht, im Rahmen einer einfachen Abschätzung den Einfluss des Übergangs bei der Gasaufbereitung von der Druckwasserwäsche auf eine Aminwäsche zu ermitteln. Dabei würde die Aminwäsche zu einer Verbesserung des KEV-Wertes um ca. 15 % bzw. 0,04 kWh/kWh führen. Insgesamt liegen alle Varianten im Bereich von 0,3 kWh/kWh, so dass dieser Wert für die weitere Berech-

nung eingesetzt wird. Dass dieser Wert einen realistischen Ansatz darstellt, wurde vom Öko-Institut bestätigt [Öko 2012a]. Da in der Cordierstraße 4 Biomethan bezogen werden soll, das in einer Anlage in Frankfurt-Höchst aus Abfällen und industriellen Reststoffen hergestellt wird, sind real Werte vergleichbar der Produktion aus Gülle zu erwarten (<0,2 kWh/kWh), der angesetzt Wert von 0,3 kWh/kWh liegt somit auf der sicheren Seite.

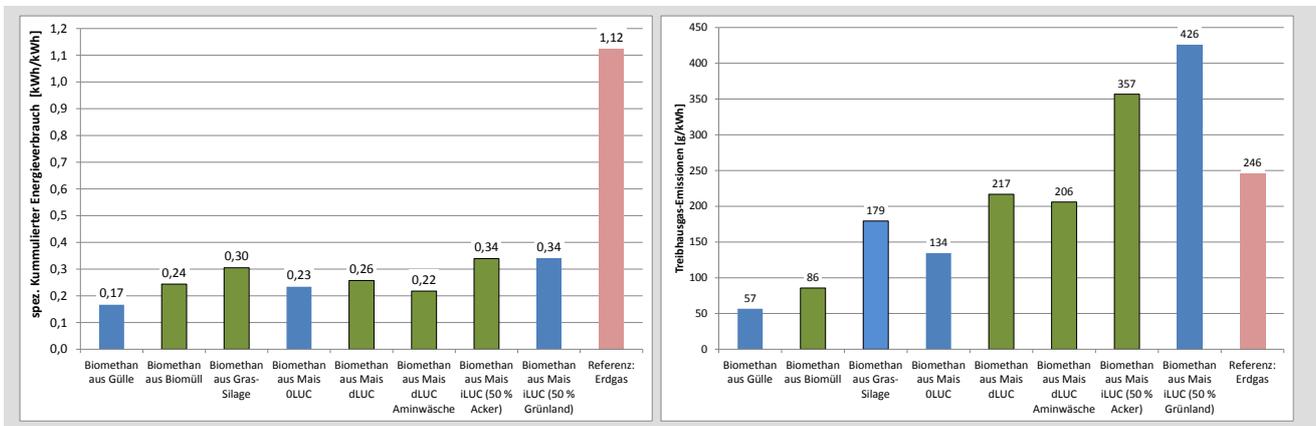


Bild 11: Vergleich der verschiedenen Varianten der Biomethan-Erzeugung, links: kumulierter Energieverbrauch, rechts: Treibhausgasemissionen

Bewertung von Rapsöl

Beim Einsatz von Rapsöl als Energieträger im Gebäude muss genau wie beim Biomethan die Umweltwirkung der Erzeugung und der Vorkette berücksichtigt werden. Auch hierfür wurden detaillierte Berechnungen mit GEMIS durchgeführt, die in [Großklos et al. 2010] ausführlich dokumentiert sind. Auch hier wurde von den Setzungen der EnEV bewusst abgewichen, um das Potenzial des Energieträgers bewerten zu können.

2.2.3 Weitere Bilanzierungsgrößen

Treibhausgasemissionen

Neben der Betrachtung des Primärenergiebedarfs existieren noch eine Reihe weiterer Bewertungsgrößen für die Umweltauswirkungen von Gebäuden, von denen besonders die Treibhausgas-Emissionen, ausgedrückt als Kohlendioxid-Äquivalent (CO₂-äquiv.) mit einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren Verweildauer in der Atmosphäre, sehr verbreitet sind. Für diese Bilanzierungsgröße geben die EnEV und die DIN-Normen keine Bewertungsfaktoren vor, so dass hier als Quelle nur die Berechnungen mit GEMIS zur Verfügung stehen.

Die Berechnungen zu Biomethan aus Kapitel 2.2.2 wurden auch für die Treibhausgasemissionen durchgeführt. Bild 11 rechts zeigt die Treibhausgasemissionen der unterschiedlichen Varianten der Biomethanproduktion. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse stark von der Art der Biogaserzeugung abhängen. Da die Schwankungsbreite so groß ausfällt, die tatsächlich vor Ort eingesetzten Substrate und Zusatzstoffe im Detail aber unbekannt sind, fällt hier die Reduktion auf einen einzelnen Wert deutlich schwerer.

Würde im BHKW flüssige Biomasse, z. B. Rapsöl eingesetzt, so wären unter anderem die Anforderungen der BiomasseStrom-Nachhaltigkeitsverordnung [BioSt-NachV 2009] zu erfüllen. Diese fordert unter anderem, dass die Biomasseverstromung eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von mindestens 35 % ergeben

muss. Außerdem muss gewährleistet werden, dass keine wertvollen Böden oder Naturschutzgebiete in Ackerland umgewandelt werden. Diese Verordnung gilt nicht für gasförmige Bioenergieträger, im Sinne der Strategie der Reduktion von Treibhausgasen ist jedoch zu fordern, dass der Einsatz von Biomethan auch vergleichbare Anforderungen erfüllt. Dies wäre bei einer Biomethanerzeugung mit indirekten Landnutzungsänderungen jedoch nicht gegeben, da die THG-Emissionen über denjenigen der Erdgas-Referenz liegen. Im Umkehrschluss wird hier unterstellt, dass die Varianten mit hohen Treibhausgasemissionen mittelfristig nicht mehr eingesetzt werden können.

Die Treibhausgasemissionen von Biogasanlagen sowie der Aufbereitungsanlagen für die Netzeinspeisung von Biogas werden in großem Maß durch den Methanschlupf in der Biogasanlage, das Gärrestlager und die Gasaufbereitung beeinflusst, da Methan ein 25-mal höheres Treibhausgaspotenzial aufweist als Kohlendioxid. Umgekehrt kann aber unterstellt werden, dass auch ein entsprechendes Optimierungspotenzial vorhanden ist, das genutzt werden kann. So ist die gasdichte Abdeckung der Gärrestlager bei den Biogasanlagen in Deutschland von 10 % (2000-2002) auf 33 % gestiegen [Biogas 2008].

Als Vorgehensweise bis zur weiteren Klärung der tatsächlichen Emissionsfaktoren der konkreten Produktionsanlage wird vorgeschlagen, den auf 200 g/kWh gerundeten Wert von „Biomethan Mais dLUC Aminwäsche“ zu verwenden. Dieser Wert liegt fast viermal höher als der Emissionsfaktor für Biomethan aus Gülle, also der Erzeugung aus Reststoffen und somit auch deutlich auf der sicheren Seite.

Tabelle 7 zeigt die verwendeten Treibhausgasfaktoren für alle Energieträger, die im Folgenden betrachtet werden.

Tabelle 7: Treibhausgasemissionen [GEMIS]

Energieträger	CO ₂ -Äquivalent in g CO ₂ /kWh
Strommix Deutschland	594
Photovoltaik	92
Biomethan	200
Rapsöl	179

Biomassepotenzial

Beim Einsatz biogener, nachwachsender Energieträger ist es wichtig zu berücksichtigen, dass diese nicht in unbegrenzter Menge zur Verfügung stehen und aus diesem Grund ebenso sparsam eingesetzt werden müssen wie fossile Energieträger. Aus diesem Grund wurde in [Diefenbach 2002] ein Biomassepotenzial hergeleitet, das die in Deutschland verfügbare, energetisch und stofflich nutzbare Biomasse gleichmäßig auf die gesamte Gebäudefläche verteilt. Es ergibt sich ein Wert von 35 kWh/(m²a) bis 40 kWh/(m²a), je nach Bezugsfläche. Ein Gebäude kann nur dann als nachhaltig eingestuft werden, wenn der Biomasseverbrauch das Biomassepotenzial nicht übersteigt. Der Biomasseverbrauch wird aus diesem Grund bei den weiteren Bilanzierungen ebenfalls untersucht.

2.3 Der Weg zum Energiegewinn

Bisher realisierte Gebäude, die einen Energieüberschuss erzielen, waren oft Einfamilien- oder Reihenhäuser, die durch große Photovoltaikflächen in der Jahresbilanz so viel elektrische Energie erzeugen, wie für Beheizung, Warmwasserbereitung und Haushaltsstrom erforderlich ist. Mehrfamilienhäuser hingegen weisen aufgrund der typischerweise höheren Bewohnerdichte einen höheren Energiebedarf pro Quadratmeter Wohnfläche für elektrische Energie und Warmwasser auf. Gleichzeitig steht weniger (Dach-)Fläche für die solare Energieerzeugung pro Quadratmeter Wohnfläche zur Verfügung.

Um auch bei Mehrfamilienhäusern einen Ausgleich von Erzeugung und Bedarf zu erreichen, muss die Energieeffizienz in allen Bedarfsbereichen erhöht werden.

Am Beispiel des Neubaus des Gebäudes Cordierstraße 4 in Frankfurt am Main wird aus diesem Grund ein ganzheitliches Effizienzkonzept entwickelt, durch das der Energiebedarf des Gebäudes deutlich reduziert werden kann. Die Eckpunkte dieses Konzeptes lauten:

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

Aufbauend auf einer sehr hohen Energieeffizienz kann dann der verbleibende Energiebedarf mit regenerativen Energieträgern gedeckt und in der Jahresbilanz ein Energiegewinn erzielt werden.

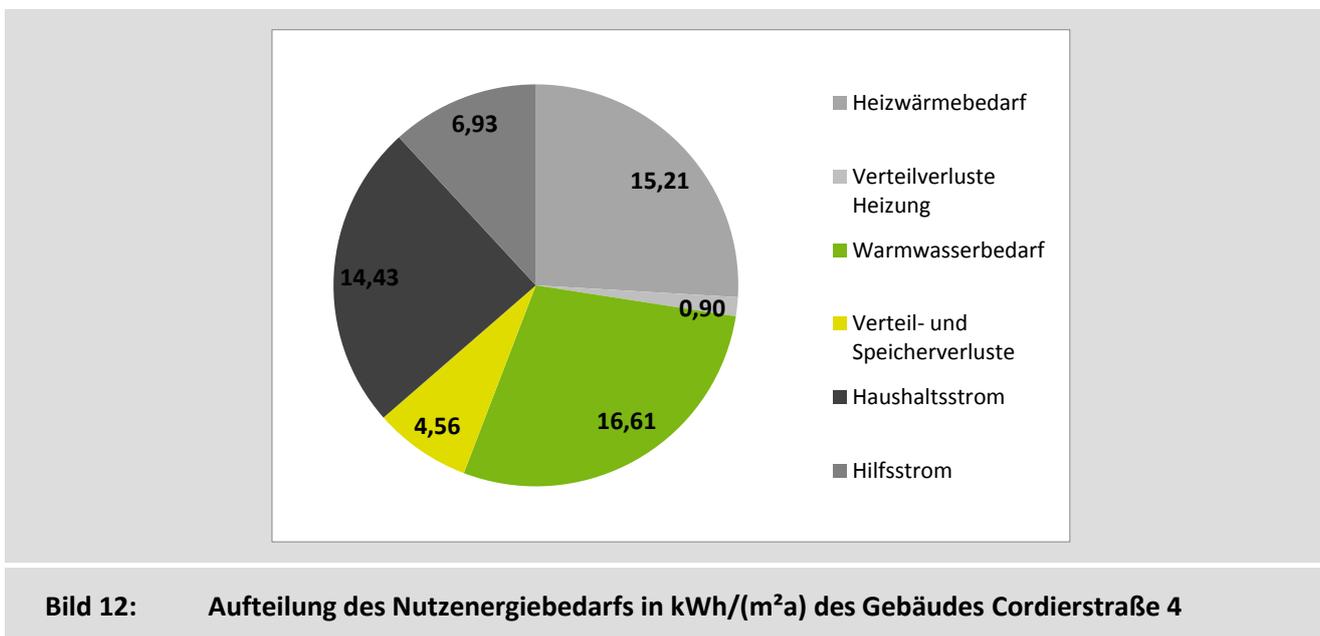
Aus Sicht der Autoren ist dieser Weg zum Energiegewinn, vorrangig über eine ganzheitlich sehr hohe Energieeffizienz des Gebäudes und erst im Anschluss Deckung des verbleibenden Energiebedarfs mit regenerativen Energien, die erfolgsversprechendste und im Sinne des Klimaschutzes nachhaltigste Variante zur Planung und Umsetzung eines Gebäudes mit Energieüberschuss in der Jahresbilanz. Bestehende Projekte (vgl. [Großklos et al 2013] und [Großklos, Schaede 2013]) zeigen, dass eine sehr hohe Energieeffizienz des Gebäudes auch im Betrieb unter realen Bedingungen wichtigster Baustein für die Erreichung der gesteckten Ziele ist.

In der aktuellen Diskussion zu Plusenergiegebäuden werden auch Gebäudekonzepte diskutiert, bei denen der Energiebedarf nicht in dem hier beschriebenen Maße reduziert wird. Dieser muss dann entweder durch erhöhte Energieproduktion am Gebäude und/oder durch die Anlagentechnik kompensiert werden. In der Praxis zeigt sich, dass diese Konzepte funktionieren können, jedoch für den Fall, dass die Anlagentechnik nicht optimal geregelt ist oder Fehlfunktionen aufzeigt, das Ziel des Energieüberschuss umso weiter verfehlen. Auch bei hohem Komfortanspruch der Nutzer, dies zeigt sich insbesondere in den gemessenen höheren Raumtemperaturen (>20 °C) oder erhöhtem Warmwasserverbrauch (>25l/Tag) in [Großklos 2013], belastet dies die Energiebilanz des weniger energieeffizienten Gebäudes umso stärker. Die Reduzierung des Energiebedarfs in allen Bedarfsbereichen ist daher nicht nur für die Erreichung der bilanziellen Ziele notwendig, sondern auch um im realen Betrieb optimale Resultate erzielen zu können.

Im Folgenden wird daher zuerst auf die Umsetzung des ganzheitlichen Effizienzkonzeptes zur Reduktion des Energiebedarfs in allen Bereichen eingegangen (Kapitel 3) und schließlich werden verschiedene Anlagentechniken zur Deckung des verbleibenden Energiebedarfs vorgestellt (Kapitel 4).

3 Reduktion des Energiebedarfs in allen Bedarfsbereichen

Während in der Vergangenheit bei vielen Projekten besonderer Fokus auf der Reduktion des Heizwärmebedarfs lag, wird es nun immer wichtiger auch den Wärmebedarf für Warmwasser, sowie den Hilfs- und vor allem Haushaltsstrombedarf zu reduzieren. Gerade der Haushaltsstrombedarf ist im Vergleich zum Heizwärmebedarf bis vor wenigen Jahren weiter angestiegen (vgl. [BMWi 2013]), daher ist es besonders wichtig auch in diesem Bereich Einsparungen zu erzielen. In diesem Kapitel werden die in der Cordierstraße 4 geplanten Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs in den verschiedenen Bedarfsbereichen aufgezeigt. Bild 12 stellt den Nutzenergiebedarf des Gebäudes nach der Reduktion des Energiebedarfs in allen Bereichen dar.



3.1 Reduktion des Wärmebedarfs

3.1.1 Reduktion des Heizwärmebedarfs – Neubau im Passivhaus-Standard

Der Bau im Passivhausstandard stellt eine der effizientesten und kostengünstigsten Varianten zur Einsparung von Heizwärme dar und ist daher eine wichtige Grundlage für die Erreichung des Energiegewinns. Die Passivhausbauweise ist mittlerweile lange erprobt und gehört in Frankfurt zum Standard im Neubau und wird teilweise auch bei der Sanierung umgesetzt. So hat die Stadt Frankfurt bereits 2006 die Passivhausbauweise in ihre Klimaschutzbeschlüsse aufgenommen (vgl. [Stadt Frankfurt 2006]), und die ABG Frankfurt Holding baut Neubauten fast ausschließlich in Passivhausbauweise. So wird auch die Cordierstraße 4 als Passivhaus realisiert. An dieser Stelle soll jedoch nicht ausführlich auf die Passivhausbauweise eingegangen werden, sondern lediglich wesentliche Details des hier umgesetzten Passivhauses und die in diesem Projekt bestehenden Herausforderungen für die Passivhausbauweise dargestellt werden. Herausforderungen waren insbesondere die ungünstige Ausrichtung des Gebäudes nach Ost/West und besondere Anforderungen in der Baugenehmigung, des Bauherrn und des Brandschutzes.

Thermische Hülle

Die thermische Hülle des Gebäudes wird, wie bei Passivhäusern üblich, umlaufend gedämmt, es werden Passivhausfenster eingesetzt und auf eine luftdichte, möglichst wärmebrückenfreie Konstruktion geachtet. In Tabelle 8 sind die einzelnen Bauteilaufbauten dargestellt und die U-Werte der Bauteile dargestellt. Der Wert der Fenster stellt den flächengewichteten Mittelwert aller Fenster dar.

Tabelle 8: Bauteilaufbauten

Bauteil	Aufbau/Material	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]	U-Wert [W/(m ² K)]
Außenwand West und Nord komplett sowie Süd und Ost teilweise (von innen nach außen)	Innenputz	0,8	10	0,103
	Kalksandstein SRD 2,0	1,1	175	
	Dämmung EPS	0,032	300	
	Außenputz	0,8	15	
Außenwand Süd und Ost in Bereichen mit höheren Brandschutzanforderungen (von innen nach außen)	Innenputz	0,8	10	0,127
	Kalksandstein SRD 2,0	1,1	175	
	Dämmung Mineralwolle	0,04	300	
	Außenputz	0,8	15	
Fenster	Passivhausfenster (abhängig von der Größe)	0,68-0,75		$\phi = 0,707$
Dach (von oben nach unten)	Substrat	0,597	100	0,077
	Folienabdichtung	0,4	3	
	Dämmung	0,032	400	
	Betondecke	2,1	260	
	Innenputz	0,8	10	
Bodenplatte (von oben nach unten)	Linoleum	0,17	5	0,105
	Trittschalldämmung	0,04	10	
	Estrich	1,4	70	
	Trittschalldämmung	0,04	15	
	Beton	2,1	250	
	Dämmung	0,035	300	

Die Dämmung der Außenwand auf der Ostseite des Gebäudes ist im Bereich der Erschließung über Laubengänge aufgrund der Brandschutzanforderungen mit Mineralwolle ausgeführt. Aufgrund des schlechteren U-Wertes der Mineralwolle erhöht sich der U-Wert dieses Bauteils. Daher wurde in den nicht kritischen Bereichen an der Südseite der Ostwand und im EG, soweit dies möglich war, mit EPS gedämmt (vgl. Bild 13). Auf der Südseite ist eine Photovoltaik-Anlage an der Fassade geplant, aus diesem Grund wird auch hier mit Mineralwolle gedämmt.

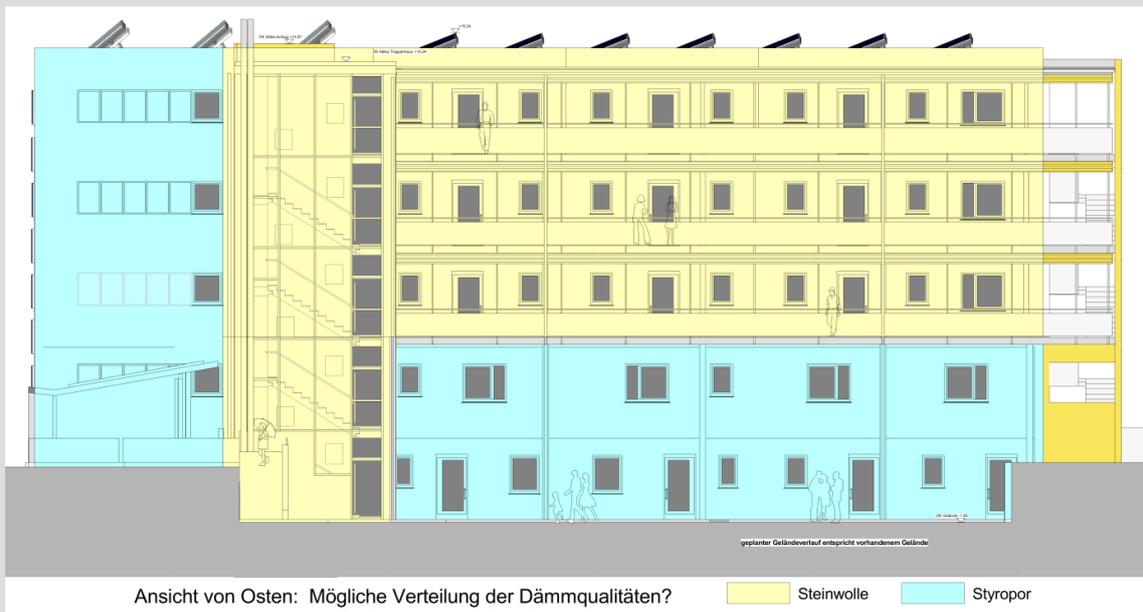


Bild 13: Dämmung auf der Ostseite: EG EPS-Dämmung, im Bereich der Laubengänge Mineralwolle; oben: Planungsstand September 2012; unten: Ausführung September 2013

Quelle: oben: faktor10, unten: IWU

Wärmebrücken

Trotz der möglichst Wärmebrücken-freien Konstruktion lassen sich einzelne Wärmebrücken nicht vermeiden. Diese sind in Bild 14 dargestellt. Negative Werte ergeben sich durch die bei Außenmaßbezug zweifach berücksichtigten Teilflächen an geometrischen Wärmebrücken (z. B. vertikale Außenecken). Die Berechnung der Wärmebrücken und die Bilanzierung mit dem PHPP sowie nach EnEV wurden in einem gesonderten Auftrag von der ABG FH beauftragt, daher wird dies in dem Bericht nur auszugsweise dargestellt.

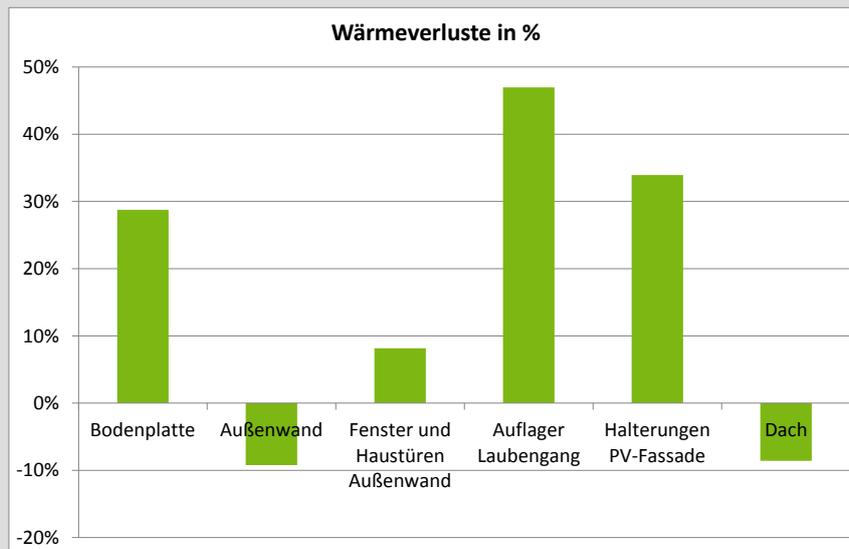


Bild 14: Wärmebrückenverluste Cordierstraße 4

Luftdichte Gebäudehülle

Die Luftdichtheit spielt bei diesem Gebäude, analog allen Passivhäusern, eine sehr wichtige Rolle um Wärmeverluste aufgrund von unkontrolliertem Luftaustausch zu verhindern. Die beauftragten Firmen sind Passivhaus erfahrene, dadurch können hier sehr gute Luftdichtheitswerte erwartet werden. Insbesondere der luftdichte Anschluss der Fenster stellt für die Luftdichtheit ein wichtiges Detail dar, die Ausführung ist in Bild 15 dargestellt.



Bild 15: Ausführung des luftdichten Anschlusses der Fenster in der Bauphase

Lüftungskonzept

Die Lüftung des Gebäudes erfolgt über wohnungsweise Lüftungsanlagen mit hoher Wärmerückgewinnung (6x Vallox KWL80SC in den 2-Zimmer-Wohnungen und 11x Vallox KWL90SC in den größeren Wohnungen). Bild 16 zeigt das wohnungsweise Lüftungskonzept (links) und das eingesetzte Lüftungsgerät Vallox KWL90SC (rechts).

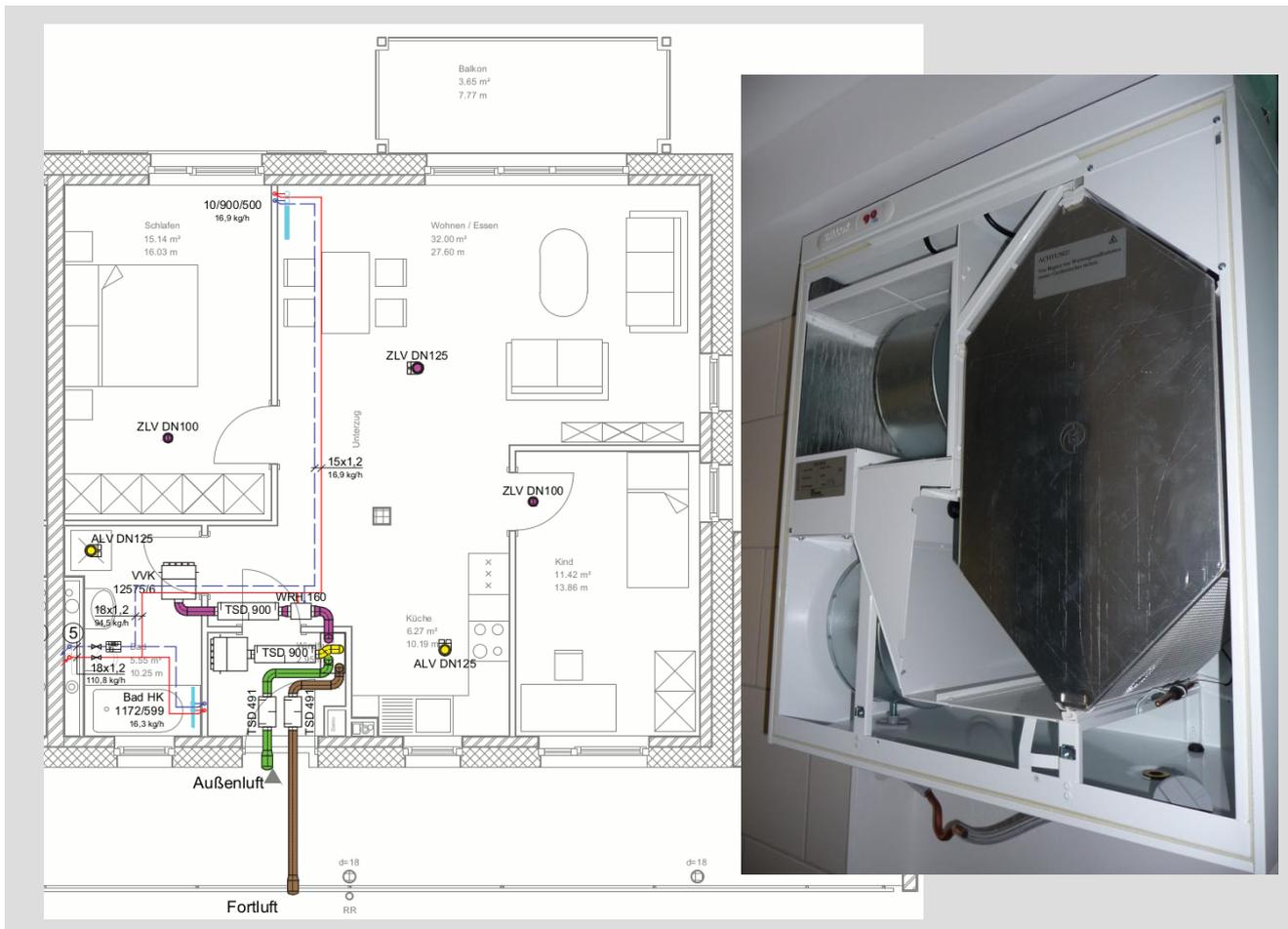


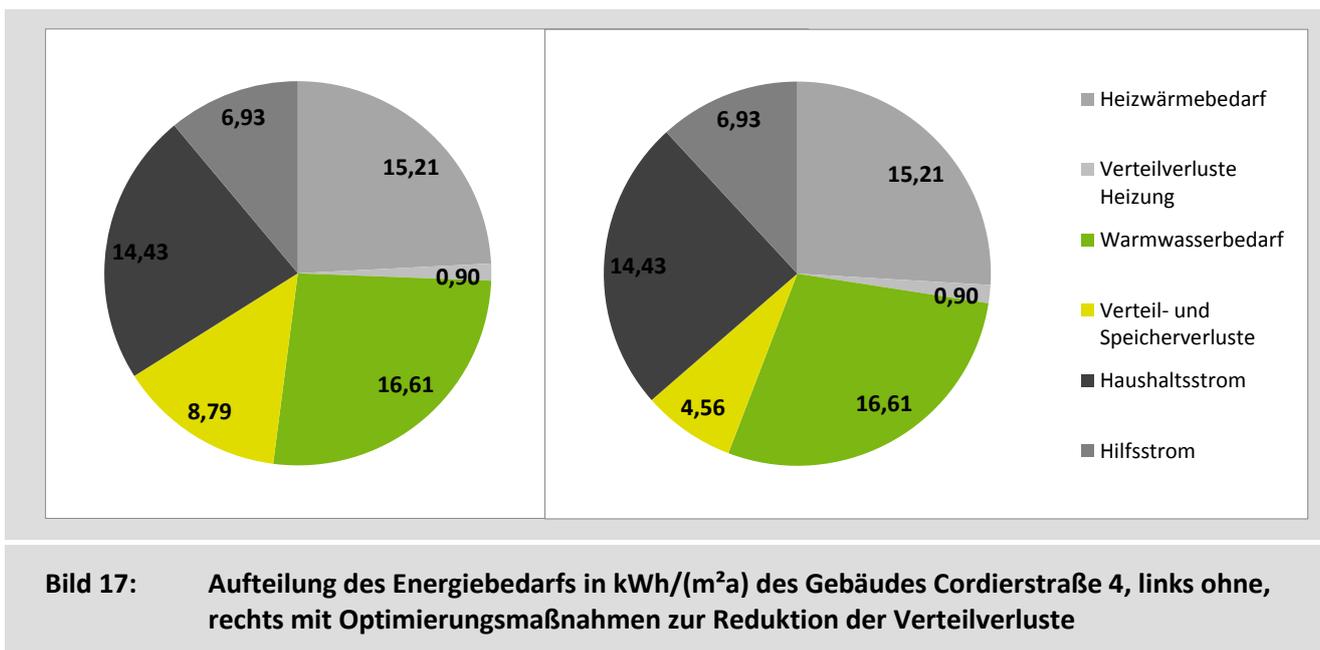
Bild 16: Lüftungskonzept mit wohnungsweisen Lüftungsanlagen (links), eingesetztes Lüftungsgerät (rechts)

Quelle: links: ibs Planung Lüftung, rechts: IWU (Projekt Rotlintstraße)

Die Entscheidung, in diesem Projekt eine wohnungsweise Lüftung umzusetzen, basierte auf mehreren Kriterien. Die wichtigsten waren, dass dadurch Brand- und Schallschutzanforderungen einer zentralen Lüftungsanlage umgangen werden konnten und die guten Erfahrungen der Planer mit den bewährten Lüftungsgeräten für die wohnungsweise Lüftung.

3.1.2 Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser

Der Wärmebedarf für Warmwasser wurde auf Grundlage des Energiebedarfs für Warmwasser nach Annahme des PHPPs von 25 l/(Person*Tag) bei 60 °C berechnet. Aufgrund einer verhältnismäßig hohen projektierten Bewohnerzahl von 39 Pers (ca. 31 m²_{EBF}/Pers) ergibt sich der Wärmebedarf für Warmwasser von 16,63 kWh/(m²a). Die Verteil- und Speicherverluste erreichen ohne Optimierungsmaßnahmen am Leitungsnetz etwa die Hälfte des Nutzwärmebedarfs für Warmwasser (vgl. Bild 17 links), obwohl hier bereits die aufgrund des Neubaus verhältnismäßig kurzen Rohrleitungslängen berücksichtigt werden konnten. Durch verschiedene Optimierungsmaßnahmen werden diese Verteilverluste im Projekt Cordierstraße 4 um fast 50 % reduziert (vgl. Bild 17, rechts) (siehe unten).



Zur Reduktion des Warmwasserbedarfs werden bei allen vom Vermieter installierten Zapfstellen Wasser-spararmaturen montiert. Der für die Berechnung angenommene Warmwasserbedarf von 25 l/(Person*Tag) wird jedoch trotz Spararmaturen beibehalten, da sich in vermessenen Projekten (vgl. [Großklos 2013]) der Trend zu höheren Komfortansprüchen und einem Warmwasserbedarf auf oder über dem im PHPP ange-setzten Niveau gezeigt hat, obwohl auch dort Spararmaturen eingesetzt wurden. Dem Trend zu höheren Warmwasserverbräuchen sollte nicht nur durch energieeffizientere Technik begegnet werden, sondern auch durch Motivation der Nutzer zu energiesparendem Verhalten.

Wärmeverluste

Neben den Maßnahmen zur Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser ist es wichtig, die Wärmever-teil- und -speicherverluste so weit wie möglich zu reduzieren. Insbesondere in Mehrfamilienhäusern ent-stehen bei zentraler Warmwasserbereitung aufgrund der benötigten Verteilung und Zirkulation hohe Ver-teilverluste. In vermieteten Mehrfamilienhäusern läuft die Zirkulation für gewöhnlich durchgängig, so auch in dem Projekt Cordierstraße 4. Varianten einer zeitweisen Abschaltung der Zirkulation in den Nachtstun-den und die mögliche Aktivierung der Zirkulation über entsprechende Schalter wurden diskutiert, wurden aber nicht weiter verfolgt da den Mietern innerhalb kurzer Zeit warmes Wasser zur Verfügung stehen soll-te.

Die hohen Verluste in der Verteilung sprechen auf der einen Seite gegen eine zentrale Warmwasserbereitung, da diese Verluste bei einem dezentralen System nicht entstehen würden. Eine zentrale Warmwasserbereitung ist jedoch für die Einbindung regenerativer Energien (Solarthermie und Biomasse) notwendig und aufgrund des Komforts von Bauherren erwünscht. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger, die Wärmeverluste im Bereich der Warmwasserverteilung möglichst weit zu reduzieren. Weiterhin können diese Wärmeverluste, auch wenn sie in der thermischen Hülle anfallen, außerhalb der Heizperiode nicht genutzt werden und können dann zu einer unerwünschten Erwärmung des Gebäudes führen.

Maßnahmen zur Reduktion der Verteilverluste

In der Cordierstraße 4 wird ein ganzes Maßnahmenbündel zur Reduktion der Verteilverluste umgesetzt. Dieses setzt sich zusammen aus einer erhöhten Dämmung der Zirkulationsleitungen auf 250 % bezogen auf die Anforderungen der EnEV, einer Absenkung der Warmwassertemperatur auf 48 °C, möglich durch den Einsatz einer Diaphragmalypse und den Einsatz eines Rohr-in-Rohr-Systems für die vertikalen Steigleitungen (vgl. Bild 18).



Bild 18: Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser: Erhöhte Dämmung der Rohrleitungen Warmwasser 250 % nach EnEV (links), Einsatz einer Diaphragmalypse (Mitte) und Rohr-in-Rohr-System (rechts)

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

Durch die Dämmung der Zirkulationsleitungen mit 250 % gegenüber den Mindestanforderungen der EnEV können die Verteilverluste der Warmwasserbereitung im Verhältnis zum Nutzwärmebedarf von 53 % auf 43 % reduziert werden (vgl. Bild 19). Dies entspricht einer Reduktion der Verluste um 19 %. Eine erhöhte Dämmung der Zirkulationsleitungen ist über die Energieeinsparung hinaus aufgrund zwei weiterer wesentlicher Faktoren unbedingt zu empfehlen: Durch die dickere Dämmung reduziert sich die Abwärme der Zirkulationsleitung, die Wohnungen werden dadurch außerhalb der Heizperiode weniger erwärmt. Eine Erwärmung der Wohnungen wäre hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes kontraproduktiv. Zusätzlich

werden die meist neben den Warmwasserleitungen verlegten Kaltwasserleitungen weniger aufgeheizt. Dies hat Vorteile in Hinsicht auf die Hygiene der Wasserverteilung. Auch wenn nach den aktuellen Verordnungen (vgl. [TrinkwV 2001]) in der Praxis nur Kontrollen der Warmwasserleitungen auf Verkeimung durchgeführt werden, ist dieses Problem auch in Kaltwasserleitungen anzutreffen, besonders wenn diese aufgrund ihrer Nähe zu schlecht gedämmten Warmwasserleitungen häufig Temperaturen von bis zu 25 °C erreichen.

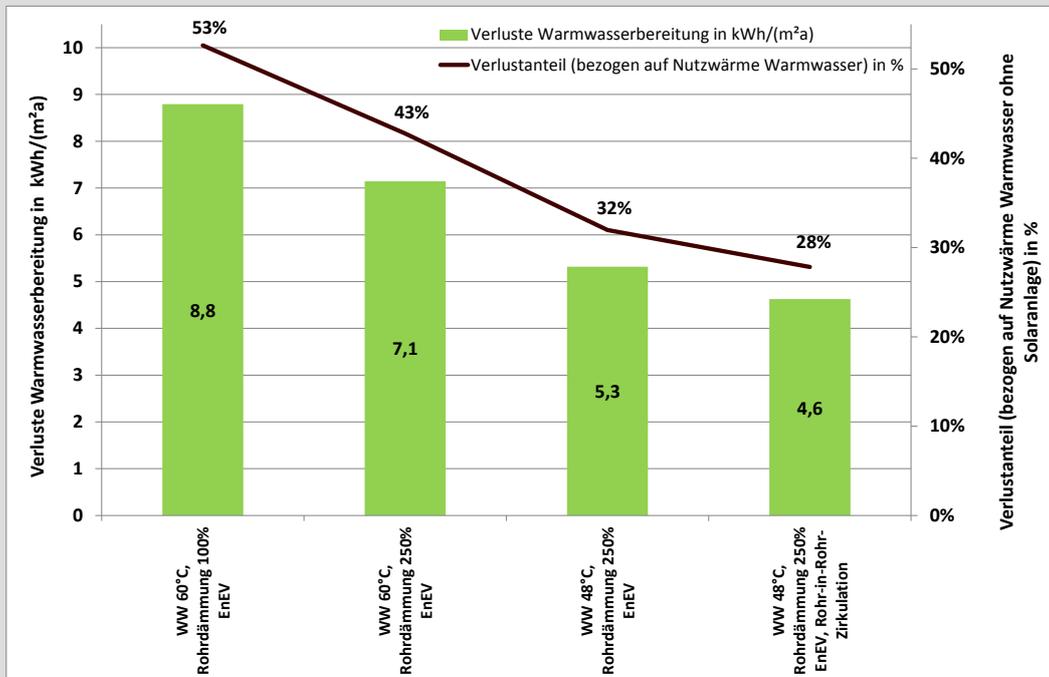


Bild 19: Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmen zur Reduzierung des Wärmebedarfs für Warmwasser in der Cordierstraße 4

Quelle: IWU

Zweite Maßnahme zur Reduktion der Verteilverluste der Warmwasserverteilung ist die Reduktion der Warmwassertemperatur von 60 °C (wobei in der Praxis häufig höhere Temperaturen von 65 °C bis sogar 70 °C vorliegen) auf eine Temperatur von 48 °C. Dadurch können die Verteilverluste der Warmwasserverteilung im Verhältnis zum Nutzwärmebedarf weiter reduziert werden. Ursache ist die deutlich geringere Temperaturdifferenz zur Umgebung, so dass deutlich weniger Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Durch die Reduzierung der Warmwassertemperatur können die Verteilverluste im Projekt Cordierstraße 4 von 43 % auf 32 % reduziert werden (vgl. Bild 19). Dies entspricht einer Reduktion der Verluste um weitere 21 %, zusätzlich zu der Reduzierung der Verluste um 19 % durch die erhöhte Dämmung der Zirkulationsleitungen. Möglich wird diese Reduktion der Warmwassertemperatur durch eine chemische Desinfektion mittels einer Diaphragmalyse (vgl. Bild 18 Mitte). Dieser Prozess erzeugt aus einer wässrigen Lösung von Salztabletten hypochlorige Säure und dosiert diese in sehr geringen Mengen in das Trinkwasser ein. Bild 20 zeigt die Dosierpumpe der Wasserbehandlung (links), auf der rechten Seite ist das Vorratsbecken mit der Salzlösung zu sehen.



Bild 20: Details der Wasserbehandlungsanlage Diaphragmalyse: Dosieranlage (links), Solebehälter mit Salztabletten (rechts)

Quelle: IWU (Projekt Rotlintstraße)

Komforteinbußen müssen die Nutzer durch diese verringerte Warmwassertemperatur nicht hinnehmen. Bei den üblichen Warmwasserinstallationen mit einer Warmwassertemperatur von 60 °C findet ohnehin vor der Entnahmestelle als Verbrühungsschutz eine Reduktion der Warmwassertemperatur durch Beimischung von Kaltwasser statt, so dass das warme Wasser auch bei diesen Systemen nur mit ca. 50 °C entnommen wird. Die Umsetzung in anderen Projekten (vgl. [Rasch 2012]) zeigt, dass für die Nutzer noch geringere Warmwassertemperaturen von 45 °C ausreichend sind.

Bild 21 stellt noch einmal die Reduzierung der Verteilverluste abhängig von der Dämmung der Rohrleitungen für das Projekt Cordierstraße 4 dar.

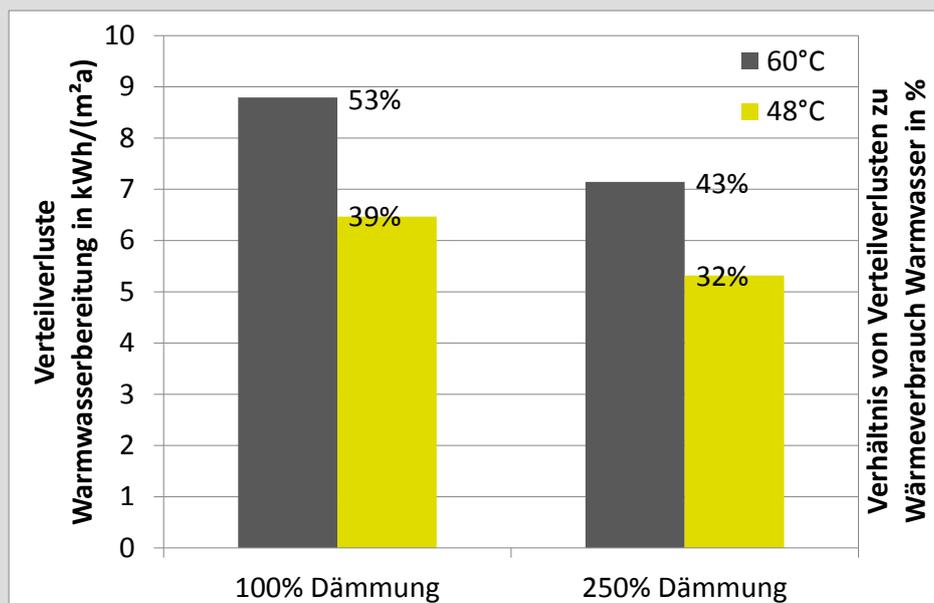


Bild 21: Einfluss der Warmwassertemperatur und der Dämmdicke auf die Verteilverluste in der Cordierstraße 4

Dritte Maßnahme zur Reduktion der Verteilverluste ist der Einsatz eines Rohr-in-Rohr-Systems für die Steigleitungen der Zirkulation (vgl. Bild 18 rechts). Bei diesem System wird der Zirkulationsrücklauf in einem kleinen Kunststoffrohr innerhalb der Warmwasserleitung zum Wärmeerzeuger zurückgeführt. Auf diese Weise entfällt daher eine komplette Steigleitung, während die Warmwasserleitung, aufgrund des Rücklaufs in der Mitte der Leitung, lediglich mit etwas größerem Durchmesser installiert wird. Dieses System ist jedoch nur für die vertikalen Leitungen einsetzbar. Trotz dieser Einschränkung können die Verteilverluste im Projekt Cordierstraße 4 durch den Einsatz dieses Systems noch einmal von 32 % auf 28 % reduziert werden (vgl. Bild 19). Dies entspricht einer Reduktion der Verluste um weitere 7,5 %, zusätzlich zu den bisherigen Maßnahmen. Insgesamt konnten so durch diese drei Maßnahmen die Verteilverluste von 53 % des Wärmebedarfs für Warmwasser um 25 % auf 28 % reduziert werden. Dies entspricht nahezu einer Halbierung der Verteilverluste.

3.2 Reduktion des elektrischen Energiebedarfs

Der Reduktion des elektrischen Energiebedarfs kommt bei energieeffizienten Gebäuden immer größere Bedeutung zu. Nachdem der Heizwärmebedarf durch Bauweise im Passivhausstandard so weit wie möglich gesenkt wurde und auch zur Senkung des Wärmebedarfs für Warmwasser Effizienztechnologien vorhanden sind, gilt es, auch den elektrischen Energiebedarf weitestgehend zu reduzieren. Wie in Bild 12 gezeigt, hat die elektrische Energie trotz Umsetzung diverser Konzepte zur Reduktion des Bedarfs noch einen Anteil von einem Drittel des gesamten Nutzenergiebedarfs.

3.2.1 Reduktion des Hilfsstrombedarfs

Elektrische Hilfsenergie wird in vielen Gebäudebereichen (z.B. Allgemeinbeleuchtung, Anlagentechnik) eingesetzt. Bei Mehrfamilienhäusern wird hier häufig auch von Allgemeinstrom gesprochen. Die Höhe des Allgemeinstroms in üblichen Mehrfamilienhäusern des Gebäudebestandes beträgt laut [Clausnitzer, Hoffmann 2009] ca. 250-335 kWh pro Jahr und Wohnung, bzw. 3-5 kWh/(m²Wohnfläche*a), inklusive der Hilfsenergie für Heizung und Warmwasserbereitung. Als wesentliche Verbrauchskategorien werden im Rahmen genannten Studie die in Tabelle 9 aufgelisteten Bereiche untersucht:

Tabelle 9: Anwendungen mit Hilfsenergieverbrauch (Auszug aus [Clausnitzer, Hoffmann 2009])

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

In der Cordierstraße 4 liegt der Hilfsstrombedarf höher als in den Bestandsgebäuden der Studie von [Clausnitzer, Hoffmann 2009]. Dies ist bedingt durch die deutlich aufwändigere Anlagentechnik zur Reduktion des Energieverbrauchs des Gebäudes in der Cordierstraße 4. So verbrauchen diverse Komponenten, die auf der Seite des Wärmebedarfs und der Wärmeerzeugung einen Effizienzgewinn erzielen, zu ihrem Betrieb elektrische Energie. Im Vergleich zu einem Mehrfamilienhaus im Gebäudebestand hat das Gebäude in der Cordierstraße 4 z. B. statt nur einem Gerät für die Wärmeerzeugung durch die Kombination von solarthermischer Anlage und Blockheizkraftwerk, gleich mehrere Wärmeerzeuger, die jeweils Hilfsenergiebedarf für Pumpen und Regelung aufweisen. Analog verhält es sich mit der Diaphragmalyse zur Wasseraufbereitung, auch die wohnungsweisen Lüftungsgeräte erzeugen einen wesentlichen Strombedarf, der im Hilfsstrombedarf berücksichtigt ist. Der Effizienzgewinn auf der Wärmeseite rechtfertigt diesen Strombedarf, jedoch darf dieser bei der Betrachtung der Gesamtenergiebilanz des Gebäudes nicht vernachlässigt werden. Tabelle 10 zeigt den Hilfsstrombedarf des Gebäudes Cordierstraße 4.

Tabelle 10: Aufteilung des Hilfsstrombedarfs Cordierstraße 4

Anlage	Beschreibung	kWh/a	kWh/(m ² a)	%
Lüftungsanlagen	dezentrale Lüftungsanlagen (17 Wohnungen)	4.018	3,29	48
Heizungsanlage	Pumpen und Regelung	707	0,58	8
Trinkwasseranlage	Pumpen und Regelung	752	0,62	9
Sonstiger Hilfsstrom	Allgemeinbeleuchtung, Diaphragmalanalyse, Aufzug, Klingelanlage	2.975	2,44	35
Summe		8.452		100

Im Verhältnis zu den vielen einzelnen Komponenten, die Hilfsstrombedarf verursachen, ist dieser jedoch mit 6,9 kWh/(m²a) vergleichsweise gering. In der Planungsphase wurde fortwährend versucht, die Anzahl der Geräte, die Hilfsstrom benötigen, gering zu halten. Im Anschluss wurden hocheffiziente Komponenten eingesetzt, um den Bedarf möglichst niedrig zu halten.

Energieeffizienter Hilfsstromeinsatz

Ein wesentlicher Bereich, in dem in der Cordierstraße 4 Hilfsstrom eingespart werden konnte, ist der Aufzug. Durch die Erschließung des Gebäudes über Laubengänge gibt es nur ein zentrales Treppenhaus mit einem Aufzug. Ein weiteres Treppenhaus ohne Aufzug stellt den zweiten Fluchtweg bereit. Auf diese Weise musste bei dem Gebäude Cordierstraße 4 lediglich ein Aufzug berücksichtigt werden. Wäre das Gebäude über innen liegende Treppenhäuser erschlossen worden, wären zwei Treppenhäuser mit insgesamt zwei Aufzügen und somit höherem Hilfsenergieverbrauch erforderlich gewesen. Positive Auswirkungen hat dieses eine, außerhalb der thermischen Hülle liegende Treppenhaus mit Aufzug natürlich auch auf die Wärmebilanz des Gebäudes, außerdem entfallen Anschaffungs-, Wartungs- und Betriebskosten des zweiten Aufzuges.

Besondere Bedeutung kommt auch dem Einsatz eines energiesparenden Aufzuges zu. Dieser weist einen besonders geringen Standby- und Betriebsverbrauch auf. Der Energieverbrauch des Aufzuges wird durch folgende Maßnahmen reduziert: Eine Beleuchtung der Kabine mit LED-Technologie reduziert den Energiebedarf weiter. Die Regelung des Aufzuges berücksichtigt eine Ausschaltung der Kabinenbeleuchtung bei Stillstand sowie eine spannungslose Türverriegelung im Stillstand. Durch eine geringere Fahrtgeschwindigkeit wird weitere Energie eingespart.

Ähnliche Aufzüge wurden bereits im Projekt Rotlintstraße eingebaut (vgl. [Großklos 2013]). Hier war es zwar nicht möglich, den elektrischen Energieverbrauch eines Aufzuges getrennt vom Allgemestrom zu messen, jedoch zeigt die Auswertung der Allgemestromverbräuche insgesamt, dass die eingesetzten Aufzüge aufgrund des insgesamt geringen Allgemestrombedarfs sehr effizient sein müssen.

Ein weiterer Hilfsenergie einsparender Aspekt der außen liegenden Erschließung des Gebäudes über Laubengänge ist der dadurch bedingte höhere Tageslichteinfall. Die helligkeits- und größtenteils anwesenheitsgesteuerte Allgemeinbeleuchtung wird daher weniger Betriebsstunden im Jahr aufweisen als bei innen liegenden Treppenhäusern. Ein Teil der Außenbeleuchtung wird jedoch aus Sicherheitsgründen bei Dunkelheit durchgängig genutzt.

Ein großer Teil an Hilfsenergie kann zusätzlich durch die Nutzung eines Carports eingespart werden. Der Carport stellt Fahrrad- und PKW-Stellplätze auf Straßenhöhe bereit. Dadurch kann eine Tiefgarage eingespart werden. Tiefgaragen haben für gewöhnlich einen hohen elektrischen Energiebedarf, da sie einerseits einen hohen Hilfsstrombedarf für die Beleuchtung aufweisen und die Tiefgarageneinfahrt teilweise für die die Schnee- und Eisfreihaltung beheizt wird (mit elektrischen Heizmatten mit einer Heizleistung von 200-300 W/m²). Diese Komponenten konnten teilweise eingespart werden. So wird für den Carport, da hier Tageslicht einfällt, weniger Hilfsstrom für Beleuchtung benötigt als für eine Tiefgarage. Aufgrund der Erschließung auf Straßenhöhe wird keine elektrische Heizmatte zur Schnee- und Eisfreihaltung benötigt.

Auch bei Pumpen und der Beleuchtung in Kellerräumen und Außenanlagen wurden Gerätetypen mit möglichst hoher Energieeffizienz eingesetzt. Dazu gehört der Einsatz von Hocheffizienzpumpen im Bereich der Wärmeerzeugung und -versorgung sowie der Einsatz energiesparender, helligkeits- und anwesenheitsgesteuerter Außenbeleuchtung auf LED-Basis.

3.2.2 Reduktion des Haushaltsstrombedarfs

Während der Heizwärmebedarf der Gebäude in den letzten Jahren stetig zurückgeht, ist beim Stromverbrauch bis vor Kurzem ein ansteigender Trend zu verzeichnen (vgl. [BMWi 2013]), aktuell stagniert der Stromverbrauch der Haushalte auf hohem Niveau. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, ist es besonders wichtig, auch in diesem Bereich Einsparungen zu erzielen. Diese lassen sich zum großen Teil durch effizientere Technik erreichen, aber auch das Nutzerverhalten besitzt insbesondere beim Stromverbrauch für Unterhaltungselektronik einen sehr großen Einfluss. Der Trend zu sehr großen, meist viel verbrauchenden Flachbildschirm-TVs und der verstärkten Nutzung von PCs mit immer mehr Leistung von häufig 150 Watt und mehr sowie die generell verstärkte Nutzung von Unterhaltungselektronik, hat in den letzten Jahren zu steigenden Haushaltstromverbräuchen geführt. Relativ gut ist der Haushaltstromverbrauch in der Küche durch energiesparende Geräteausstattung, besonders Kühlschrank und Geschirrspülmaschine, zu begrenzen.

In der Cordierstraße 4 wird dem Problem des hohen Haushaltstromniveaus durch Vorinstallation energieeffizienter Geräte und Beleuchtung begegnet. Darüber hinaus ist es ein wichtiges Ziel, die Mieter zu energiesparendem Verhalten zu motivieren. Dies wird im Rahmen einer Einweisung der Mieter in die Ziele und die Technik der Cordierstraße 4 versucht. Weitere Möglichkeiten (z. B. eine Visualisierung der Energieverbräuche) waren angedacht, konnten aufgrund der Kosten leider nicht umgesetzt werden.

Um den Haushaltstrombedarf zu reduzieren, werden daher energieeffiziente Haushaltsgeräte höchster Effizienzklassen in den Küchen vorinstalliert. Weiterhin werden Trockenschränke installiert, wodurch die Mieter keine elektrischen Wäschetrockner mehr einsetzen müssen. Bild 22 zeigt die Einsparpotenziale einzelner energieeffizienter Geräte im Vergleich zu Standardgeräten.

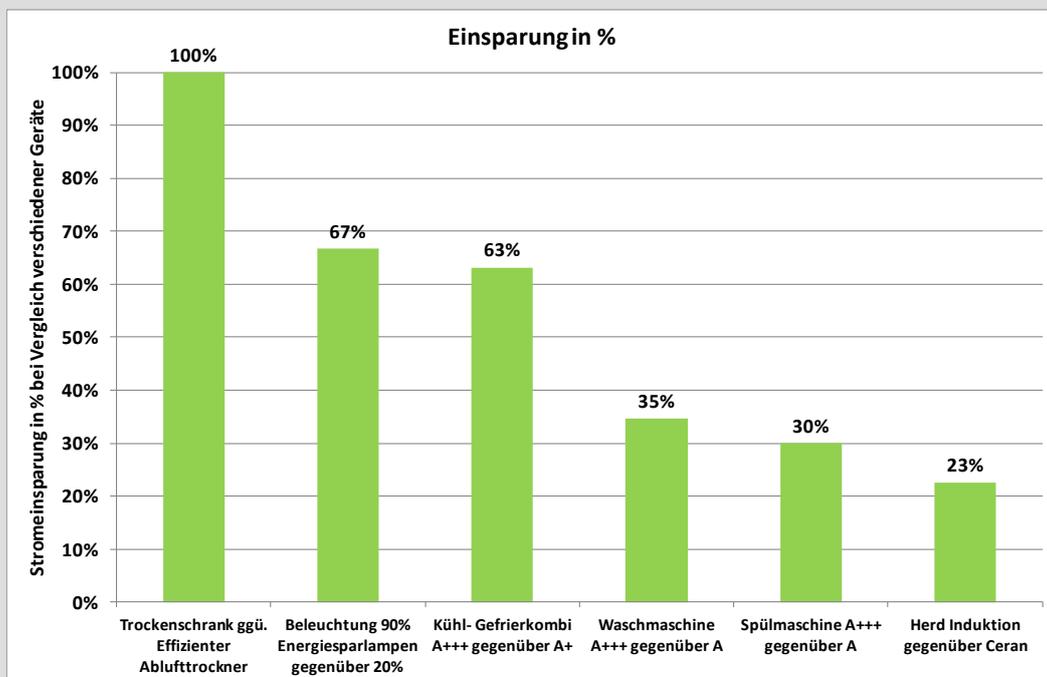


Bild 22: Energieeinsparung durch Haushaltsgeräte und Beleuchtung höchster Effizienzklassen

Quelle: IWU

In der Cordierstraße 4 werden die Geräte der dargestellten Effizienzklassen eingesetzt. Lediglich beim Herd wird kein Induktionskochfeld, sondern ein Ceranfeld genutzt, da es den zukünftigen Mietern nicht zugemutet werden soll, das zur Nutzung des Induktionskochfeldes benötigte Kochgeschirr anschaffen zu müssen. Zusätzlich werden energiesparende Dunstabzugshauben installiert. Obwohl manche Hersteller ihre Geräte bezüglich des reduzierten Energieverbrauchs sogar anpreisen, gibt es kaum Geräte am Markt, die eine energiesparende Beleuchtung vorinstalliert haben. Dies wird in der Cordierstraße 4 daher nachträglich umgerüstet, da davon ausgegangen wird, dass die Beleuchtung über dem Herd durchaus häufig genutzt wird.

In allen Zimmern der Wohnung wird energieeffiziente Beleuchtung installiert. Den zukünftigen Mietern wird jedoch die Gelegenheit gegeben, auch eigene Beleuchtung anschließen zu können; dazu werden entsprechende Deckenauslässe vorgesehen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das Beleuchtungskonzept und die vorinstallierte Beleuchtung den meisten Mietern ausreicht und gefällt. Zusätzlich werden in den meisten Räumen Standby-Abschalter eingebaut mit denen einzelne Steckdosenbereiche bei Verlassen des Raumes leicht abgeschaltet werden können.

Bild 23 zeigt die Übersicht des elektrischen Energiebedarfs, berechnet mit dem PHPP. Insgesamt ergibt sich ein Elektroenergiebedarf von 21,4 kWh/(m²a). Dieser teilt sich auf in 14,43 kWh/(m²a) für Haushaltsstrom und 6,93 kWh/(m²a) Hilfsstrom.

Anwendung	vorhanden? (1/0)	In der fernmischen Hülle? (1/0)	Nombedarf	Nutzungsfaktor	Häufigkeit	Bezugsgröße	Nutzenergie (kWh/a)	Anteil elektrisch Anteil nichtelektrisch	Strombedarf (kWh/a)
Geschirrspülen	1	1	0,82 kWh/Anw.	1,00	65 (P*a)	39,0 P	2077	100% / 0%	2077
Waschen	1	1	0,80 kWh/Anw.	1,00	57 (P*a)	39,0 P	1789	100% / 0%	1789
Trocknen mit:	1	1	0,01 kWh/Anw.	0,75	57 (P*a)	39,0 P	17	100% / 0%	17
Trockenschrank (kalt) in Al							0		
Energieverbr. durch Verdunstung	1	1	3,13 kWh/Anw.	0,50	57 (P*a)	39,0 P	3479	100% / 100%	0
Kühlen	0	1	0,78 kWh/d	1,00	365 d/a	17 HH	0	100% / 0%	0
Gefrieren oder Kombination	0	1	0,88 kWh/d	1,00	365 d/a	17 HH	0	100% / 0%	0
Kochen mit	1	1	0,42 kWh/d	1,00	365 d/a	17 HH	2592	100% / 0%	2592
Kochen mit	1	1	0,25 kWh/Anw.	1,00	500 (P*a)	39,0 P	4875	100% / 0%	4875
Beleuchtung	1	1	23 W	1,00	2,90 kh/(P*a)	39,0 P	2630	100% / 0%	2630
Elektronik	1	1	78 W	1,00	0,55 kh/(P*a)	39,0 P	1666	100% / 0%	1666
Kleingeräte etc	1	1	50 kWh	1,00	1,00 (P*a)	39,0 P	1950	100% / 0%	1950
Summe Hilfsstrom							8452		8452
Sonstiges:							0		0
							0		0
							0		0
Summe							29526 kWh		26047
Kennwert									21,4

Bild 23: Übersicht des elektrischen Energiebedarfs der Cordierstraße 4, berechnet mit dem PHPP 2012

3.3 Nutzerverhalten

In der Planungsphase werden Energiebilanzen für Gebäude mit Standardnutzungsbedingungen erstellt. Während bei der Bilanzierung nach EnEV / DIN V 18599 und PHPP z. B. mit 20 °C Raumtemperatur gerechnet wird, zeigen die Messergebnisse aus verschiedenen energetisch ambitionierten Modernisierungsvorhaben in Bild 24, dass die realen Temperaturen besonders bei Gebäuden mit sehr geringen Heizwärmeverbräuchen unter 30 kWh/(m²a) deutlich höher ausfallen und real zwischen 21 °C und 23 °C liegen. Temperaturen von einzelnen Wohnungen erreichen teilweise sogar Werte von 25 °C im Heizperiodenmittel. Weitere Einflussgrößen auf die Energiebilanz, bei denen die realen Werte unter Umständen von den Planwerten abweichen, sind z. B. der Warmwasser- und Haushaltsstromverbrauch sowie die Personenbelegungsdichte, die Auswirkungen und jeweils Konsequenzen für die inneren Wärmequellen haben können.

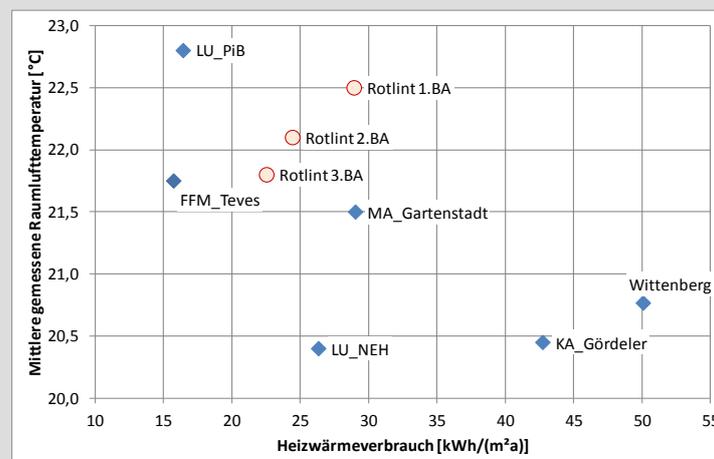


Bild 24: Gemessene mittlere Raumtemperaturen verschiedener energetisch modernisierter, vermieteter Mehrfamilienhäuser, aufgetragen über dem gemessenen Heizwärmeverbrauch [Großklos et al. 2013]

Das Ziel von Gebäuden mit Energiegewinn muss es sein, den Überschuss nicht nur in der Planung sondern auch im bewohnten Zustand unter realen Nutzungsbedingungen zu erreichen. Aus diesem Grund wurden bei der Planung des Gebäudes Cordierstraße 4 vor allem die Auswirkungen höherer Raumtemperaturen untersucht, damit das Gebäude auch bei 21 °C, 22 °C und 23 °C Raumtemperatur und somit höherem Heizwärmeverbrauch noch einen Energieüberschuss erreichen kann. Auch wurden die Auswirkungen eines um 20 % bzw. 40 % erhöhten Warmwasserbedarfs betrachtet.

Die Gründe für die abweichenden Temperaturen und Verbräuche können bei den individuellen Bedürfnissen der Mieter liegen, möglich ist aber auch geringeres Energiebewusstsein oder fehlende Information über die Bedienung der Anlagentechnik. Aus diesem Grund sind gerade in Gebäuden mit Energieüberschuss eine Einweisung der Mieter und auch Rückmeldungen über den individuellen Verbrauch als Motivation zu energiesparendem Verhalten sinnvoll. Die Einweisung soll in der Cordierstraße 4 durchgeführt werden, die ursprünglich angedachten Displays zur Verbrauchsvisualisierung und -rückmeldung konnten aus Kostengründen nicht umgesetzt werden. Dafür erhalten die Mieter individuelle Verbrauchsrückmeldungen mit der Einordnung ihres Verbrauchs am Ende der Heizperiode.

4 Deckung des verbleibenden Restenergiebedarfs mit regenerativen Energien

Nach Reduzierung des Verbrauchs für Heizung, Warmwasser, Verteilung und Speicherung sowie elektrische Energie, muss der verbleibende Energiebedarf des Gebäudes mit regenerativen Energien gedeckt werden. Das Passivhaus mit Energiegewinn bezieht hier alle verfügbaren regenerativen Energieträger, solange sie verantwortungsvoll genutzt werden (vgl. 2.1), mit ein. In diesem Kapitel werden daher nach einer kurzen Diskussion zu regenerativen Energieträgern, zuerst die Wärmeerzeugung und im Anschluss die Stromerzeugung des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4 sowie die im Projektverlauf betrachtete Varianten dargestellt und diskutiert. Im Anschluss werden als zusätzlicher wichtiger Aspekt der gewählten Anlagentechnik die Auswirkungen des Gebäudes Cordierstraße 4 auf das elektrische Netz betrachtet.

4.1 Regenerative Energieträger

Bisher umgesetzte Gebäude mit Energieüberschuss wurden besonders bei Einfamilienhäusern so realisiert, dass sie als einzigen Energieträger elektrische Energie nutzen. [Lücking, Hauser 2012] beschreiben ihr Verständnis des „Plusenergiehauses“ wie folgt: „*Ein Plusenergiehaus ist gekennzeichnet durch ein monoenergetisches Versorgungskonzept auf Basis des Energieträgers Strom*“, die Energie wird „*in Photovoltaik- oder Kleinwindkraftanlagen produziert*“.

Die Autoren des vorliegenden Berichts sehen es als erforderlich an, in die Definition des Passivhauses mit Energiegewinn (vgl. Kapitel 2.1) die Nutzung aller verfügbaren regenerativen Energieträger mit einzubeziehen, um eine für den entsprechenden Standort optimale Energieversorgung wählen zu können. [BMVBS 2011] und [Fisch et al. 2012] sehen dies ähnlich, so dass Gebäude mit Energiegewinn nicht ausschließlich auf den Energieträger Strom reduziert werden.

Im Projekt Cordierstraße 4 wird Biomasse in Form von Biomethan, das über das Erdgasnetz zum Gebäude transportiert wird, eingesetzt. Die Energiekennwerte und Treibhausgasemissionen dieses regenerativen Energieträgers wurden in Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 ausführlich diskutiert. Der Einsatz dieses Energieträgers, z. B. in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen ist besonders dann attraktiv, wenn die elektrische Energie zu einem Zeitpunkt anfällt, zu dem sie an anderer Stelle benötigt wird, z. B. im Gebäude selbst oder während der Heizperiode in einem anderen Gebäude zum Betreiben einer Wärmepumpe. In diesem Fall wird die Energie des regenerativen Energieträgers optimal genutzt, da einerseits der Brennstoff effizienter genutzt wird als in herkömmlichen Kraftwerken und andererseits das elektrische Netz entlastet wird.

Die Frage der Auswirkungen von Gebäuden mit Energieüberschuss auf das elektrische Netz und welche Variante der Energieversorgung eines Gebäudes mit Energieüberschuss zur Energieversorgung der Zukunft am besten passt – das „nur-Strom-Konzept“ oder der effiziente Einsatz von Biomasse oder beide in optimaler Kombination – lässt sich an dieser Stelle nicht abschließend diskutieren². Es kann jedoch der vorläufige Schluss gezogen werden, dass der verantwortungsvolle Einsatz von Biomasse in Gebäuden mit hohen energetischen Standards insbesondere dann zielführend ist, wenn dadurch zusätzliche positive Auswirkungen auf das elektrische Netz zu erwarten sind. Unter dieser Zielsetzung wird das Biomethan in dem Projekt Cordierstraße 4 eingesetzt.

² Hierzu sind detaillierte Modellierungen des gesamten Gebäudebestandes und ihrer Verbrauchs- sowie Energieerzeugungsstruktur erforderlich.

4.2 Wärmeerzeugung

Nachdem der Wärmebedarf durch die in Kapitel 3 dargestellten Techniken auf ein Minimum reduziert wurde, gilt es, den verbleibenden Wärmebedarf möglichst effizient zu decken. Unter Effizienz ist in diesem Fall nicht ausschließlich Energieeffizienz zu verstehen, denn aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden (Dach-)Flächen zur solaren Energieerzeugung für elektrische Energie und Wärme, ist auch die Flächeneffizienz von entscheidender Bedeutung. Nicht vernachlässigt werden darf in diesem Punkt auch die Ressourceneffizienz (z. B. beim Einsatz von Biomasse, aufgrund des begrenzten Biomassebudgets).

Weitere Ansprüche an die Anlagentechnik sind neben der Energieeffizienz im Rahmen der Bilanzierung des Projektes in der Planungsphase auch eine möglichst hohe Effizienz während der Nutzung. Hierzu ist es zwingend notwendig, die Anlagentechnik auch unter dem Aspekt der Betriebsüberwachung, Wartbarkeit und Optimierbarkeit zu betrachten und spezielle Anforderungen des Bauherrn, bzw. der späteren Betriebsführung des Gebäudes zu berücksichtigen. Bestehende Projekte mit komplexer Anlagentechnik (vgl. [BMVBS 2013] und [Großklos 2013]) zeigen, dass eine Betriebsüberwachung und Optimierung in den ersten Betriebsjahren notwendig ist, um die geplante Performance des Gebäudes erreichen zu können.

Zusätzlich muss das Nutzerverhalten in die Wahl der Anlagentechnik mit einbezogen werden, da es einen großen Einfluss auf die Erreichung der Zielsetzungen hat. In [Großklos, Schaede 2013] ist dargestellt, dass sich in gut gedämmten Gebäuden aufgrund des Komfortanspruchs der Nutzer mit 21-23 °C häufig Raumtemperaturen einstellen, die deutlich über den in der Bilanzierung betrachteten Randbedingungen von 20 °C liegen. Dies hat Auswirkungen auf die Energiebilanz des Gebäudes im Betrieb und auf die Auslegung der Anlagentechnik.

Weiterer zentraler Bestandteil bei der Wahl der Anlagentechnik ist die Betrachtung gleich mehrerer Bewertungskriterien, hinausgehend über die reine primärenergetische Bewertung. So werden zusätzlich der entstehende Gewinn/Überschuss an elektrischer Energie sowie dessen zeitlicher Ausgleich und die Auswirkungen auf das elektrische Netz betrachtet und Kennwerte zu Endenergie, Treibhausgasemissionen in Form von CO₂-Äquivalenten und das Biomasse-Potenzial berücksichtigt.

Im Folgenden wird nun der Einsatz verschiedener Anlagentechniken in dem Projekt Cordierstraße 4 dargestellt. Die Berechnungen wurden anhand des Planungsstandes von Herbst 2012 vorgenommen, da zu diesem Zeitpunkt die Entscheidung über die Anlagentechnik getroffen werden musste. Betrachtet werden folgende verschiedene Anlagentechniken:

- Var. 1: Solarthermie und (Biomethan-)Blockheizkraftwerk
- Var. 2: Solarthermie, (Biomethan-)Blockheizkraftwerk und Spitzenlastkessel
- Var. 3: Wärmepumpe
- Var. 4: Solarthermie und Wärmepumpe

Die Aufzählung dieser Anlagentechniken macht deutlich, dass bei der Betrachtung der Wärmeerzeugung und -speicherung dies nicht unabhängig von der elektrischen Energieerzeugung erfolgen kann. Gerade der Einsatz von Blockheizkraftwerken (BHKW), die als Koppelprodukt der Wärmeerzeugung elektrische Energie produzieren oder die Nutzung von Wärmepumpen, die wiederum elektrische Energie für die Bereitstellung von Wärme verwenden, macht eine Betrachtung der gesamten Energiebilanz für Wärme und elektrische Energie erforderlich. Genauso kann eine Abwägung zwischen dem Einsatz von Photovoltaik und Solarthermie nur über eine gesamte Bilanz erfolgen. Bei den Betrachtungen im Folgenden wird daher immer Wärmebedarf und Wärmeerzeugung zusammen mit dem Bedarf und der Erzeugung elektrischer Energie dargestellt. Als Bilanzergebnisse werden Endenergie, Primärenergie und CO₂-Äquivalente dargestellt.

4.2.1 Anlagentechnik Cordierstraße 4: Solarthermie und Blockheizkraftwerk

Als erste Anlagentechnik wird die Nutzung von Solarthermie in Kombination mit einem mit regenerativen Brennstoffen betriebenen BHKW am Beispiel des Projekts Cordierstraße 4 dargestellt. Dies ist gleichzeitig diejenige Variante, die nach dem Systemvergleich umgesetzt wurde. Die Kombination des BHKWs mit einer solaren Energieerzeugung ist aus Sicht der Ressourcenschonung geboten. Würde das BHKW alleine den Wärmebedarf des Gebäudes bereitstellen, müsste an dieser Stelle zu viel Biomasse eingesetzt werden. Daher wird in der Cordierstraße 4 zusätzlich für die Wärmeerzeugung eine hocheffiziente solarthermische Anlage eingesetzt.

Die hier eingesetzte Anlagentechnik setzt auf bewährte effiziente Komponenten, die in ihrem Zusammenspiel auf die Anforderungen in dem Projekt Cordierstraße 4 optimiert wurden. Das gesamte System der Wärmeerzeugung und Speicherung wird mit Heizwasser betrieben.

Die solarthermische Anlage wurde mit der Zielsetzung dimensioniert ca. 60 % des Wärmebedarfs für Warmwasser bereitzustellen, so dass in den Sommermonaten kein anderer Wärmeerzeuger benötigt wird. Diese Auslegungsgröße entstand primär auf Basis der Zielsetzung, den Einsatz von Biomasse aufgrund des begrenzten verfügbaren Biomasse-Potenzials von $35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bezogen auf die Wohnfläche [vgl. [Diefenbach 2002]] möglichst zu reduzieren. Zum anderen sollten die vorhandenen Flächen zur solaren Energieerzeugung für Wärme und elektrische Energie effizient genutzt werden. Mit ca. 1 m^2 Kollektorfläche pro Bewohner, dies entspricht einer benötigten Wärmeerzeugung von 25-30 l Warmwasser pro m^2 Kollektorfläche und Tag, ist die Anlage somit recht großzügig ausgelegt (vgl. [VDI 6002-1]). Aufgrund der Nutzung von sehr effizienten solarthermischen Kollektoren kann sie daher mit der gegebenen Hydraulik (vgl. Bild 25) in der Übergangszeit durchaus auch zur Beheizung des Gebäudes beitragen. Sie wurde jedoch nicht speziell für diesen Fall ausgelegt.

In Bild 25 ist das Anlagenschema der Cordierstraße 4 dargestellt. Die solarthermische Anlage mit $40,2 \text{ m}^2$ Vakuumröhrenkollektor erzeugt ca. 60 % der Wärme, die für Warmwasser benötigt wird. Das BHKW (5 kW_{el} , $12,3 \text{ kW}_{\text{th}}$, zusätzlich $2,3 \text{ kW}_{\text{th}}$ über einen Kondensator) ist für die Bereitstellung des gesamten darüber hinausgehenden Wärmebedarfs von Heizung und Warmwasser zuständig. Die Gastherme (35 kW) ist als Reserve vorgesehen und wird lediglich während der Wartung oder falls das BHKW einmal ausfällt, eingesetzt. Die solarthermische Anlage und das BHKW speisen beide in zwei große Pufferspeicher (insgesamt 6 m^3) ein, dadurch kann die solar erzeugte Wärme optimal gespeichert und das BHKW sehr klein ausgelegt werden. Die Diaphragmalyse wird zur Hygienisierung des Wassers verwendet (vgl. Kapitel 3.1.2). Die Photovoltaikanlage ist zusammen mit dem BHKW für die Erzeugung der elektrischen Energie zuständig. Um diese Energie vorrangig im Gebäude selbst zu verbrauchen, ist ein elektrischer Energiespeicher vorhanden.

Wärmeverteilung und -speicherung

Die beiden großen Pufferspeicher sind in Reihe geschaltet, ein Speicher wird auf hohem Temperaturniveau betrieben, der zweite wird nachrangig auf geringerem Temperaturniveau betrieben. Die Warmwasserbereitung wird über eine Frischwasserstation durchgeführt. Diese entnimmt zusammen mit dem Heizsystem ihren Vorlauf aus dem oberen Teil des ersten Pufferspeichers. Der Rücklauf der Frischwasserstation wird bei Zirkulationsbetrieb (ca. $45 \text{ }^\circ\text{C}$ Rücklauftemperatur) in den unteren Bereich des ersten Pufferspeichers eingespeist. Bei Warmwasserabnahme reduziert sich die Rücklauftemperatur auf ca. $22 \text{ }^\circ\text{C}$, der Rücklauf wird in diesem Fall in den unteren Teil des 2. Pufferspeichers eingespeist. Der Heizungsrücklauf wird aufgrund des gegenüber dem Rücklauf der Frischwasserstation leicht höheren Temperaturniveaus in den zweiten Pufferspeicher eingespeist.

Vereinfachtes Technikkonzept Cordierstraße 4 Frankfurt am Main

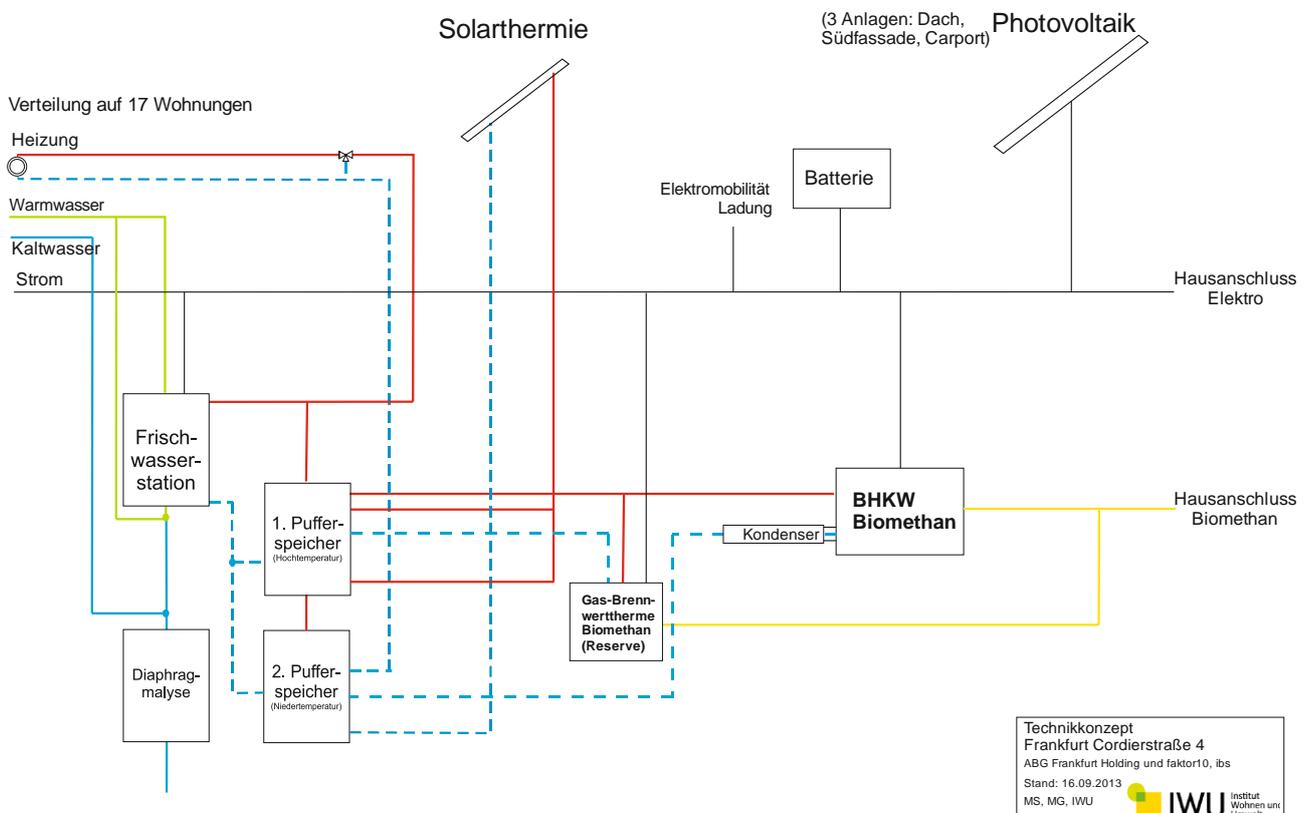


Bild 25: Technikkonzept Cordierstraße 4 Version Herbst 2012 und Umsetzung

Quelle: IWU, ABG FH, ibs, faktor10

Auch die solarthermische Anlage als primärer Wärmeerzeuger wird auf Basis von Heizungswasser betrieben. Um eine hohe Effizienz der solarthermischen Anlage zu erzielen, arbeitet diese mit den geringsten Temperaturen im System und entnimmt Wasser aus dem untersten Teil des zweiten Pufferspeichers. Die Anlage wird auf die Erzielung hoher Vorlauftemperaturen geregelt und speist mit hoher Temperatur oben, kurz unterhalb des BHKWs in den ersten Pufferspeicher ein. Da die solarthermische Anlage ohne ein Frostschutzmittel betrieben wird, wird der Frostschutz durch die Solar-Regelung sichergestellt. Hierzu wird bei zu geringen Temperaturen am Kollektor die Solarpumpe aktiviert, kaltes Wasser wird aus dem unteren Teil des zweiten Pufferspeichers entnommen, durch die Kollektoren und Rohrleitungen der Anlage gepumpt und (leider) in den unteren Teil des ersten Pufferspeichers eingespeist. Diese zweite Einspeisung der solarthermischen Anlage in den unteren Pufferspeicherbereich des ersten Pufferspeichers wird auch für zwei weitere Anlagenzustände genutzt: im Falle einer Überhitzung und Stillstand der Anlage im Hochsommer wird entstehender Dampf in den unteren Teil des Pufferspeichers eingespeist um auf diese Weise kondensieren zu können. Bei niedriger Einstrahlung (bis 350 W/m²) speist die Anlage aufgrund der geringeren erzielbaren Temperaturen auch in den unteren Teil des Puffers ein ([Bühler 2013])

Das BHKW wird wärmegeführt, abhängig von Wärmebedarf des Gebäudes und Energiebereitstellung der solarthermischen Anlage betrieben. Es speist aufgrund der hohen Vorlauftemperaturen, über der solarthermischen Anlage ein und bezieht seinen Rücklauf aus dem zweiten Pufferspeicher. Auf diese Weise kann

das BHKW mit dem Kondensator den Brennwertanteil aus dem Abgas nutzen. Die Therme, die im Falle des Defektes des BHKWs genutzt wird, ist in den oberen Teil des ersten Pufferspeichers eingebunden. Auf diese Weise kann sie im Fehlerfall schnell die benötigten Temperaturen liefern. Aufgrund ihrer Leistung muss sie im Vergleich zum BHKW nur einen sehr kleinen Teil des Pufferspeichers zur Leistungsreserve bereithalten.

Solarthermische Anlage

Bei der Wahl der Anlagenkomponenten wurde auf höchste Effizienz geachtet. Für die solarthermische Anlage werden daher CPC-Vakuurröhrenkollektoren verwendet. Bei diesen Kollektoren wird die Effizienz des typischen Vakuurröhrenkollektors weiter erhöht, indem ein CPC-Spiegel (Compound Parabolic Concentrator) die einfallende Strahlung auf den Absorber fokussiert (vgl. Bild 26 oben rechts). Laut Herstellerangabe (vgl. Bild 26) erreichen diese Kollektoren einen spezifischen jährlichen Kollektorertrag von 664 kWh/(m²a) bezogen auf die Bruttokollektorfläche unter Testbedingungen. Der Ertrag pro Bruttokollektorfläche unter Testbedingungen ist damit 30 % höher als der eines guten Flachkollektors (vgl. [WagnerSolar 2011]). In dem Projekt Cordierstraße 4 reichen daher 40 m² Kollektorfläche von CPC-Vakuurröhren-Kollektoren aus (dies entspricht inklusive den benötigten Abstandsflächen ca. 1/3 der Dachfläche der Cordierstraße 4), um ca. 60 % der benötigten Wärme für Warmwasser bereitzustellen.

AQUA PLASMA 19/34		
Anzahl der Vakuüm-Röhren	Stk	14
η_0 bezogen auf die Aperturfläche, EN 12975		0,687
Flächenbezogene Wärmekapazität c	kJ/(m ² *K)	8,78
Einfallswinkel-Korrekturfaktor		0,94
a ₁ mit Wind bez. auf Apertur	W/(m ² *K)	0,613
a ₂ mit Wind bez. auf Apertur	W/(m ² *K ²)	0,003
Jährlicher Kollektorertrag Solar Keymark*	kWh/a	2.225
Spezifischer jährlicher Kollektorertrag Solar Keymark (Bezug Aperturfläche)*	kWh/(m ² -a)	742
Spezifischer jährlicher Kollektorertrag Solar Keymark (Bezug Bruttofläche)*	kWh/a	664
Rastermaße (L x B x H)	mm	2.058 x 1.628 x 110
Bruttofläche	m ²	3,35
Aperturfläche	m ²	3
Kollektorinhalt	l	2,53
Druckverlust bei 2,0 l/min. und bei 40 °C, ca. mit Wasser	mbar	13
Montagegewicht	kg	50
Druck, max.	bar	10
Klemmringverschraubung für Vor-/Rücklauf	mm	15





*Nachweis: Solar Keymark, Anhang zum Zertifikat 011-7S 1889 R (Standort Würzburg, mittlere Kollektortemperatur 50°C)

Bild 26: Eingesetzte solarthermische Kollektoren: Auszug aus dem technischen Datenblatt (links), Darstellung zum CPC-Spiegel (rechts oben), Kollektoren während der Montage (rechts unten)

Quelle: Paradigma, rechts unten: IWU (Projekt Cordierstraße 4)

Jedoch ist nicht nur der spezifische Ertrag des Kollektors pro m² Kollektorfläche entscheidend für eine möglichst hohe solare Energieproduktion. Weitere Kriterien sind, abhängig von der zur Verfügung stehenden Dachfläche, die Maße des Kollektors. Gerade bei kleinen Dachflächen oder einer geringen Dachbreite in Südausrichtung ist die möglichst optimale Ausnutzung dieser Breite von hoher Bedeutung, um die Flä-

cheneffizienz der solaren Energieerzeugung zu erhöhen. Am Beispiel der Cordierstraße 4 mit einer verhältnismäßig geringen Dachbreite in Südausrichtung von 8,5 m – davon ist jedoch deutlich weniger nutzbar aufgrund des benötigten Abstandes zu Attika und einem Mittelgang auf dem Dach für ein Sicherheitssystem – wurden daher Simulationen zu verschiedenen Kollektoren mit unterschiedlicher Größe durchgeführt.

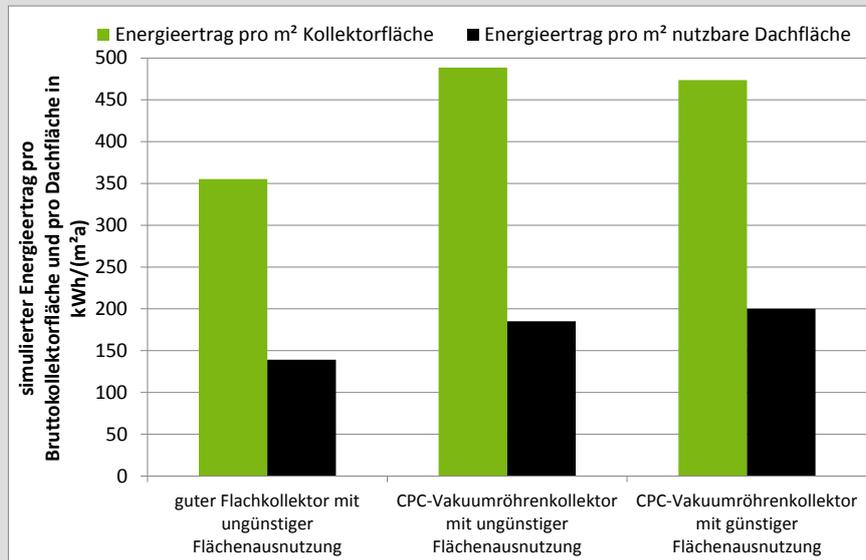


Bild 27: Energieertrag pro m² Kollektorfläche und Energieertrag pro m² nutzbarer Dachfläche von Kollektoren mit unterschiedlich guter Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Fläche

Bild 27 stellt die unterschiedlichen Ergebnisse der Simulation pro m² Bruttokollektorfläche und pro m² Dachfläche für die Cordierstraße 4 dar. Angedacht war in der Cordierstraße 4 zuerst die Nutzung guter Flachkollektoren, zur Ertragssteigerung wurden dann verschiedene hocheffiziente Vakuurröhrenkollektoren betrachtet. Die beiden Varianten des CPC-Vakuurröhrenkollektors zeigen, dass nicht immer der Kollektor mit dem höchsten spezifischen Ertrag pro Kollektorfläche auch der optimale für das entsprechende Gebäude ist. In der Cordierstraße 4 war die nutzbare Dachbreite der limitierende Faktor für die optimale Ausnutzung. Mit den Kollektoren mit ungünstiger Flächenausnutzung (Bild 27 Mitte) konnten ca. 10 % der Dachbreite weniger genutzt werden, während der Kollektor mit günstiger Flächenausnutzung (Bild 27 rechts) nahezu die gesamte Breite ausnutzte. Dieser erzielte trotz des etwas geringeren spezifischen Kollektorertrags einen leicht höheren Ertrag bezogen auf die Dachfläche. Dieser Effekt zeigte sich bei der Planung der solarthermischen Kollektoren, wie später auch noch einmal bei der Planung der Photovoltaik. Insgesamt zeigen die Auswertungen jedoch, dass die spezifische Effizienz der Kollektoren den größten Anteil an der Steigerung des solaren Energieertrages pro Dachfläche einnimmt. Der Energieertrag pro Dachfläche sollte jedoch, wenn eine hohe Flächeneffizienz benötigt wird, unbedingt berücksichtigt werden. Auf diese Weise können Kollektoren mit leicht schlechterem spezifischem Ertrag, die im Preisvergleich häufig etwas günstiger sind, auch energetisch günstigere Ergebnisse liefern.

Blockheizkraftwerk

Bei der Wahl des BHKWs wurde analog der anderen Anlagenkomponenten auf hohe Effizienz geachtet, indem es mit einem Kondensator ausgestattet ist, so dass eine Brennwertnutzung erfolgt und der eingesetzte Brennstoff bestmöglich genutzt wird. Das BHKW erreicht so gemäß Herstellerdatenblatt (vgl. Tabelle 11) einen thermischen Wirkungsgrad von 74 % und einen elektrischen Wirkungsgrad von 26 %.

Tabelle 11: Auszug aus dem Datenblatt des verwendeten BHKW

Typ	Dachs G 5.0 Low NOx Brennwert	
Thermische Leistung	14,6 kW (12,3 kW + 2,3 kW durch Brennwertnutzung)	
Elektrische Leistung	5,0 kW	
Hilfsenergie im Betrieb	0,12 kWel	
Elektrischer Wirkungsgrad	26 %	
Thermischer Wirkungsgrad	74 % (63 % + 11 % durch den Kondensator)	

Quelle: [Senertec 2012]

Das BHKW stellt nicht wie bei üblichen Auslegungen die Grundlast bereit, sondern ist nachrangig zur solarthermischen Anlage für die komplette darüber hinausgehende Wärmeerzeugung vorgesehen und wird wärmegeführt betrieben. Das bedeutet, dass es auch im Winter, wenn die solarthermische Anlage nur wenig Energie liefert, 100 % des Wärmebedarfs bereitstellen muss. Weitere wichtige Komponente der Anlagentechnik sind die Pufferspeicher von zwei mal 3 m³, bei denen auf eine starke Wärmedämmung von 160 mm geachtet wurde. Durch diese sehr großen Pufferspeicher kann das BHKW bei vergleichsweise geringer Leistung auch die Lastspitzen des Gebäudes abdecken. Für das BHKW wurden bei dieser Auslegung 2390 Volllaststunden berechnet.

Simulation des Anlagenbetriebs

Anhand dieser Anlagentechnik (vgl. Bild 29) wurden Simulationen durchgeführt. Grundlage der Simulation ist ein gemessenes Zapfprofil, das auf die projektierte Bewohnerzahl in der Cordierstraße 4 umgerechnet wurde (vgl. Bild 28) sowie der mit dem PHPP bilanzierte Heizwärmebedarf. Diese Simulationsgrundlage ist später in Kapitel 4.4, erweitert um Messdaten zum elektrischen Energieverbrauch und Simulationen zur elektrischen Energieerzeugung, Grundlage der Betrachtungen zu Deckungsgraden und elektrischen Energiespeichern.

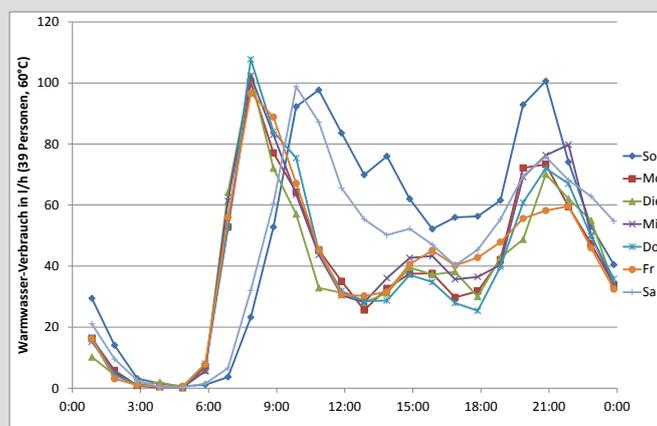


Bild 28: Warmwasserprofil für die Simulationen Solarthermie und BHKW

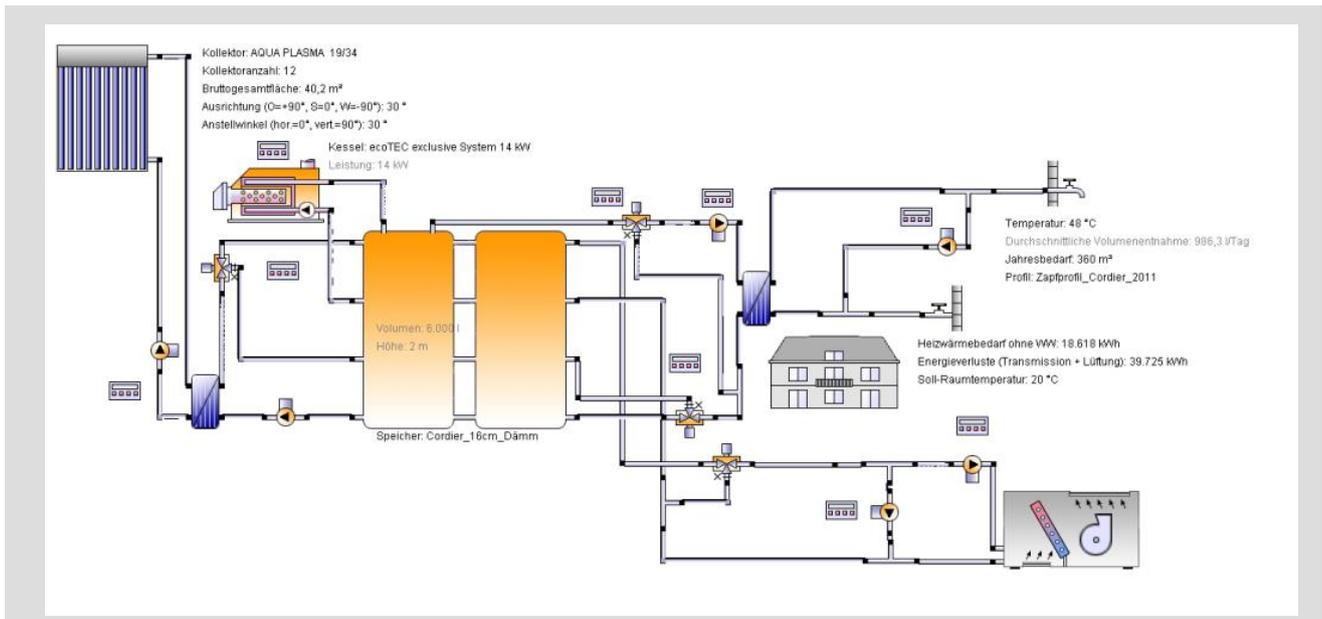


Bild 29: Anlagenschema der Simulation der solarthermischen Anlage

Quelle: Vela Solaris AG/ Simulationsprogramm Polysun

Bild 30 und Bild 31 zeigen Simulationsergebnisse zur Anlagentechnik, die in der Cordierstraße 4 verwendet wird. Aus energetischer Sicht bietet dieses Konzept viele Vorteile: Die solarthermische Anlage stellt einen großen Teil der im Sommer und in der Übergangszeit benötigten Wärme bereit (vgl. Bild 30). Das BHKW wird dadurch hauptsächlich in den Wintermonaten genutzt (vgl. Bild 31). Bei Betrachtung der elektrischen Energieerzeugung wird sichtbar, dass sich auch in diesem Bereich BHKW und Photovoltaikanlage optimal ergänzen, so dass auch in den Wintermonaten ein großer Teil des elektrischen Energiebedarfs durch die Eigenerzeugung gedeckt wird. Eine detaillierte Betrachtung dieser Zusammenhänge der elektrischen Energieerzeugung wird in Kapitel 4.4 vorgenommen.

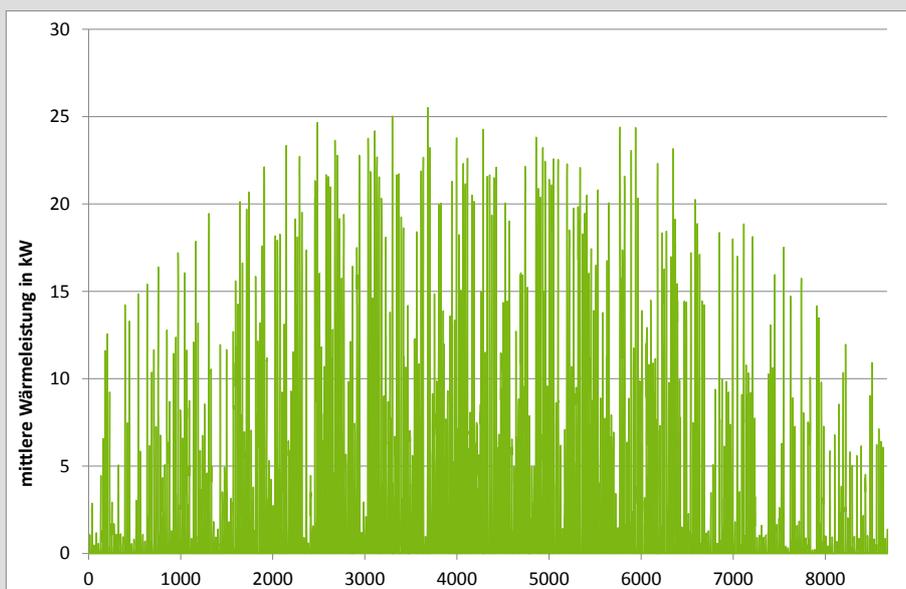


Bild 30: Mittlere Wärmeleistung der solarthermischen Anlage

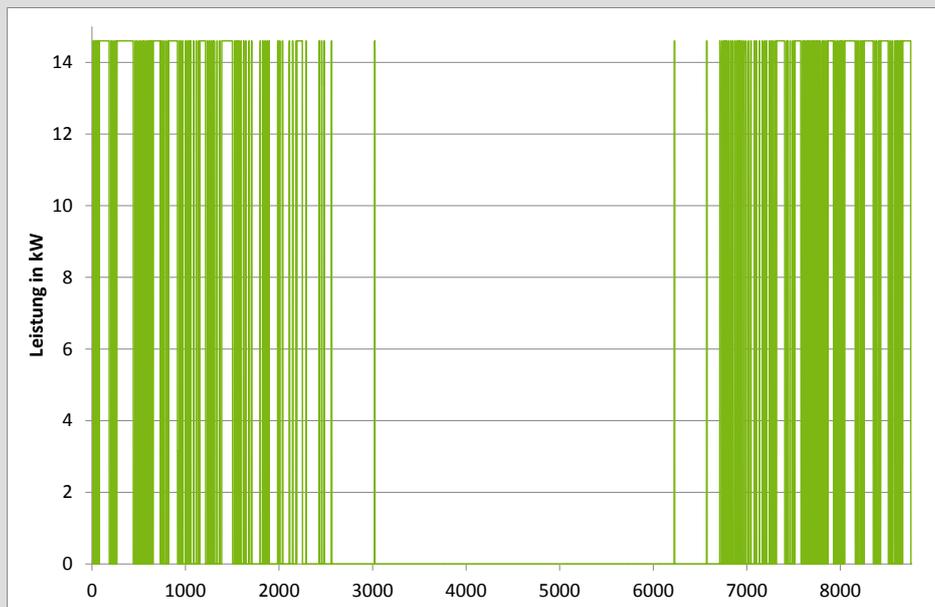


Bild 31: Wärmeerzeugung des BHKWs

In Bild 32 ist der Energiebedarf, bilanziert mit dem PHPP und die Energieerzeugung für Wärme und Strom des Passivhauses mit Energiegewinn in der Cordierstraße 4 (Planungsstand Herbst 2012) dargestellt. Bild 33 zeigt schließlich die Bilanzergebnisse für Endenergie, Primärenergie und Treibhausgasemissionen in Form von CO₂-Äquivalenten, bilanziert anhand von GEMIS-Kennwerten (vgl. Kapitel 2.2.2).

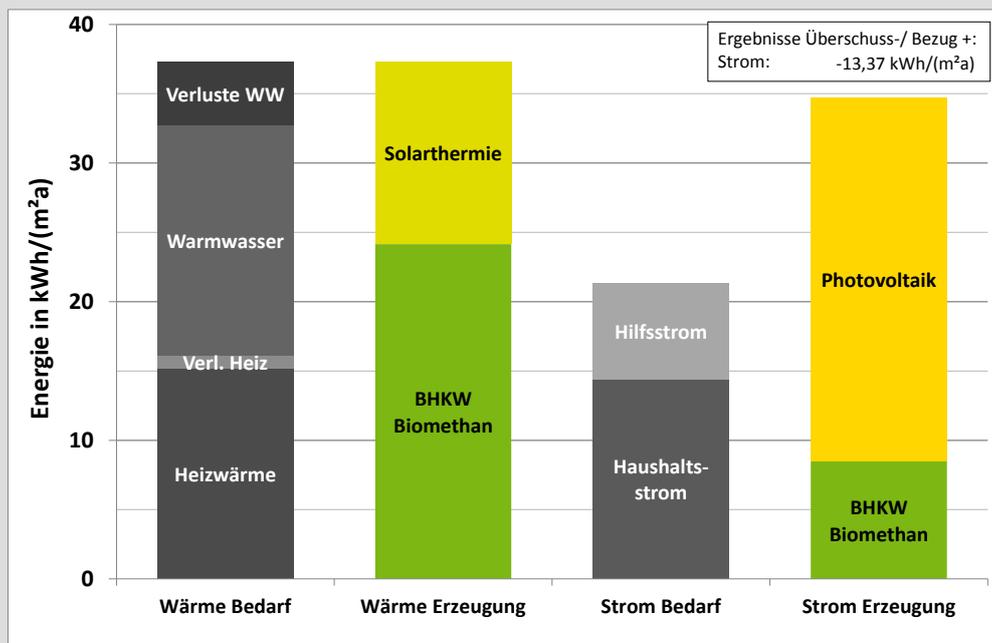


Bild 32: Einsatz von BHKW und Solarthermie: Energiebedarf und -erzeugung

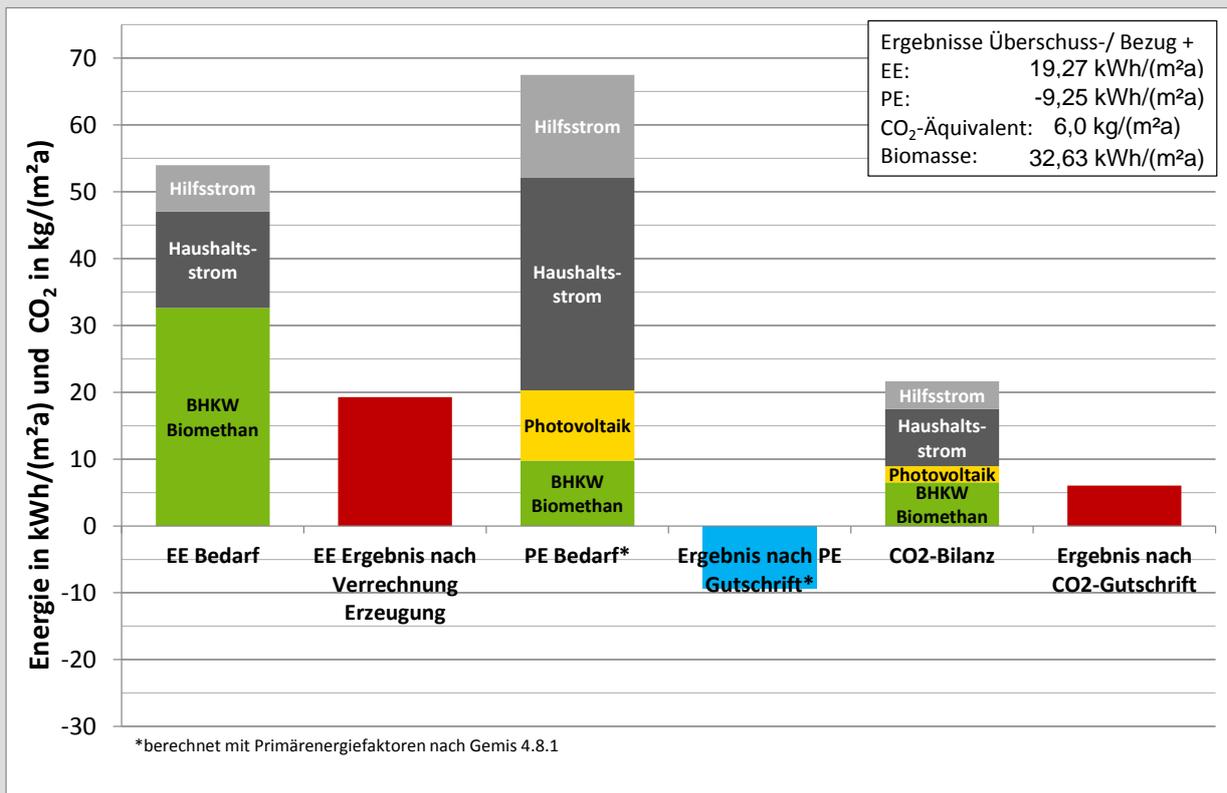


Bild 33: Einsatz von BHKW und Solarthermie: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO₂-Emissionen

In Bild 32 wird ersichtlich, dass das Gebäude 13,37 kWh/(m²a) mehr an elektrischer Energie erzeugt als es verbraucht. Dieser Energieüberschuss kann als Primärenergie-Gutschrift gegen den deutschen Strommix gerechnet werden, so dass das Gebäude bilanziell einen Primärenergiegewinn von 9,25 kWh/(m²a) erzielt (vgl. Bild 33). Aus endenergetischer Sicht verbleibt jedoch ein Energiebedarf von 19,27 kWh/(m²a), bedingt durch den Einsatz von Biomasse. Die Erreichung eines endenergetischen Energieüberschusses ist jedoch lediglich bei „nur-Strom-Gebäuden“ geboten, da hier ohne Wechsel des Energieträgers und somit ohne die Erfordernis der Bewertung unterschiedlicher Energieträger, der Endenergiebedarf ausgeglichen werden kann (entweder Überschuss und Einspeisung in das elektrische Netz oder den Bezug elektrischer Energie aus dem Netz). Sobald der Energieträger gewechselt wird und ein Brennstoff eingesetzt wird, ist in der endenergetischen Bilanz ein Überschuss aufgrund der Bewertungsmethodik nicht erreichbar. Ausnahme stellt hier die Bewertungsmethodik der DIN V 18599 Teil 9 dar, indem die Stromproduktion des dezentralen BHKWs unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren als Abzug vom Endenergiebedarf des Wärmereizgers berücksichtigt wird. Dadurch wird jedoch auch die primärenergetische Bilanzierung stark beeinflusst, weshalb diese Bewertungsmethodik an dieser Stelle nicht angewendet wurde. Zusätzlich muss an dieser Stelle noch einmal darauf verwiesen werden, dass bei möglichst geringem Einsatz von Biomasse und höchsteffizienter dezentraler Nutzung, der so in dieser Bilanz entstehende Endenergiebedarf vertretbar ist. Als wichtige Randbedingung muss bei Einsatz von Biomasse jedoch das Biomasse-Potenzial von 35 kWh/(m²a) eingehalten werden. In der Cordierstraße 4 werden 32,63 kWh/(m²a) für die Wärme- und Stromerzeugung des BHKWs eingesetzt, das Biomasse-Potenzial wird daher eingehalten.

Um die Auswirkungen dieser Anlagentechnik abhängig vom tatsächlichen Nutzerverhalten im Gebäude einschätzen zu können, wurden Parametervariationen erstellt. Berücksichtigt wurden eine sich häufig in gut

gedämmten Gebäuden einstellende höhere Raumtemperatur von 21-23 °C, sowie ein steigender Warmwasserverbrauch um 20 % sowie 40 %. Bild 34 zeigt die Entwicklung der Bilanzergebnisse abhängig vom Nutzerverhalten im Gebäude. Als für das Projekt Cordierstraße 4 realistischer Fall kann eine Raumtemperatur zwischen 22 und 23 °C angenommen werden.

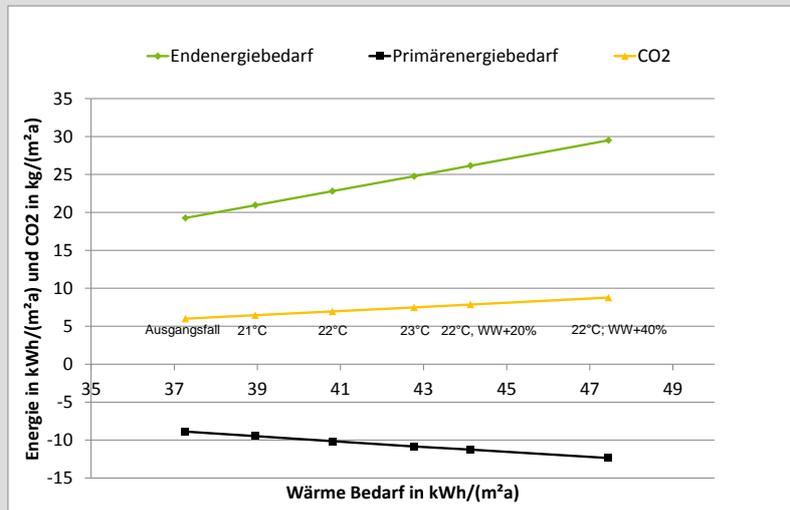


Bild 34: Einsatz BHKW und Solarthermie: Bilanzergebnisse abhängig vom Nutzerverhalten

Mit höheren Raumtemperaturen oder höherem Warmwasserverbrauch steigen auch der Endenergiebedarf und die CO₂-Emissionen. Durch den steigenden Wärmebedarf verlängert sich gleichzeitig die Laufzeit des BHKW (solange dieses die benötigte Leistung liefern kann) und somit die Primärenergiegutschrift für erzeugten Strom. Aus diesem Grund verlaufen die Kurven gegenläufig.

Wird die Steigung der Kurven betrachtet, so ist diese als sehr gering einzuschätzen. Dies ist bedingt durch die hohe Energieeffizienz des Gebäudes. Mit geringerer Energieeffizienz für Heizung und Warmwasser würde der Energiebedarf mit steigendem Komfortanspruch, in Hinsicht auf höhere Innentemperaturen und Warmwasserverbrauch, deutlich stärker ansteigen. Folglich würden schlechtere Bilanzergebnisse erzielt, bzw. die zuvor dargestellten Kurven hätten eine stärkere Steigung. Das Ziel eines Energiegewinns wäre daher eher gefährdet als bei einem sehr energieeffizienten Gebäude. Diese Betrachtung unterstützt somit die Forderung der Autoren an erster Stelle die Energieeffizienz des Gebäudes zu erhöhen und erst im Anschluss diese mit regenerativen Energien zu decken (vgl. Kapitel 2.3).

4.2.2 Solarthermie, Blockheizkraftwerk und Spitzenlastkessel

Als zweite Variante wird der Einsatz der zuvor beschriebenen Anlagentechnik, ergänzt um einen erdgasbetriebenen Spitzenlastkessel, untersucht. Diese Variante wurde von manchen Projektbeteiligten und von Externen eingebracht, da auf diese Weise das Blockheizkraftwerk kleiner ausgelegt werden könnte, die Laufzeit erhöht und die Wirtschaftlichkeit gesteigert werden könnte. Dargestellt wird hier die Nutzung des BHKWs als Grundlast (für 60 % der Wärmeerzeugung) neben der solarthermischen Anlage und die Nutzung einer erdgasbetriebenen Brennwerttherme für die Spitzenlast (40 % des nach der solarthermischen Anlage verbleibenden Energiebedarfs).

Wie bereits in der Definition des Passivhauses mit Energiegewinn (vgl. 2.1) dargestellt, können in einem Gebäude mit Energiegewinn keine fossilen Energieträger eingesetzt werden. Der Verbrauch von fossilen Energieträgern mag zwar durch Gutschriften rechnerisch ausgeglichen werden können, es liegt jedoch ein physischer Verbrauch von nicht reproduzierbaren Energieträgern vor. Daher wird der Einsatz fossiler Energieträger für das Ziel der Erreichung eines Energiegewinnes als sehr kritisch angesehen und hier nur aufgrund der Diskussionen in der Planungsphase dargestellt.

Da der Einsatz fossiler Energieträger durch Energieerzeugung anhand von Photovoltaik kompensiert werden muss, kann aufgrund der Gebäudegröße der Cordierstraße 4 und der geringen, zur solaren Energieerzeugung zur Verfügung stehenden Flächen, ein Energiegewinn nicht mehr erreicht werden. Bild 35 und Bild 36 zeigen das Ergebnis des Einsatzes dieser Anlagentechnik mit Solarthermie, BHKW (Biomethan) und Spitzenlastkessel (Erdgas). Der Endenergiebedarf liegt aufgrund der geringeren Stromerzeugung aus dem BHKW ca. 0,5 kWh/(m²a) niedriger als ohne Spitzenlastkessel, der Überschuss an elektrischer Energie sinkt jedoch um 25 % und das Gebäude kann die Ziele des Plusenergiehauses nicht mehr erreichen. Es ergibt sich ein Primärenergiebedarf von 4,67 kWh/(m²a) (gegenüber einem Primärenergieüberschuss von 8,88 kWh/(m²a) ohne Spitzenlastkessel). Noch schlechter fällt das Ergebnis aus, wenn auch für das BHKW als fossiler Energieträger Erdgas eingesetzt wird.

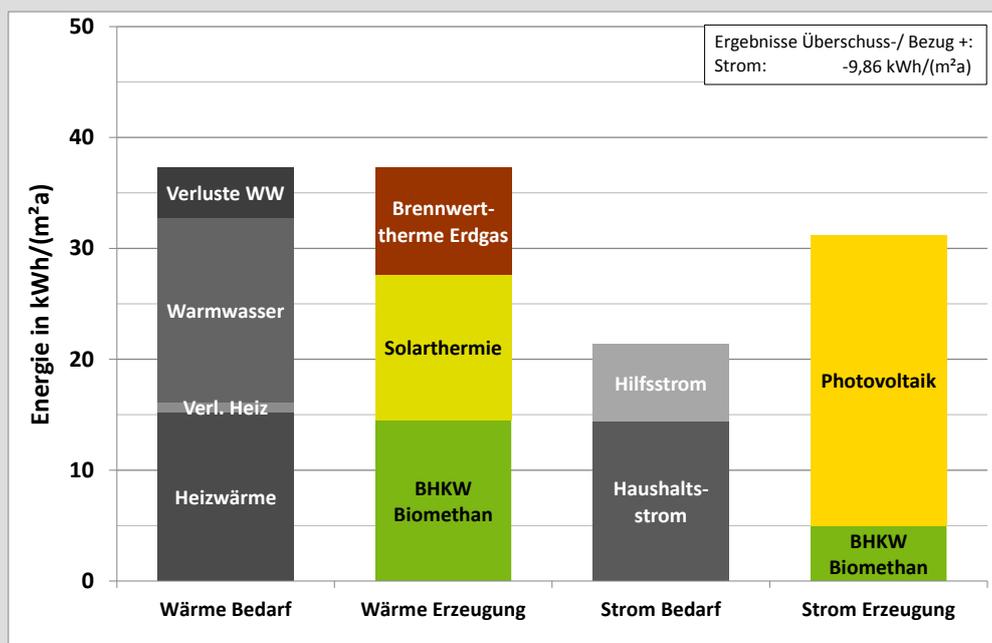


Bild 35: Einsatz von BHKW, Solarthermie und Spitzenlastkessel: Energiebedarf und -erzeugung

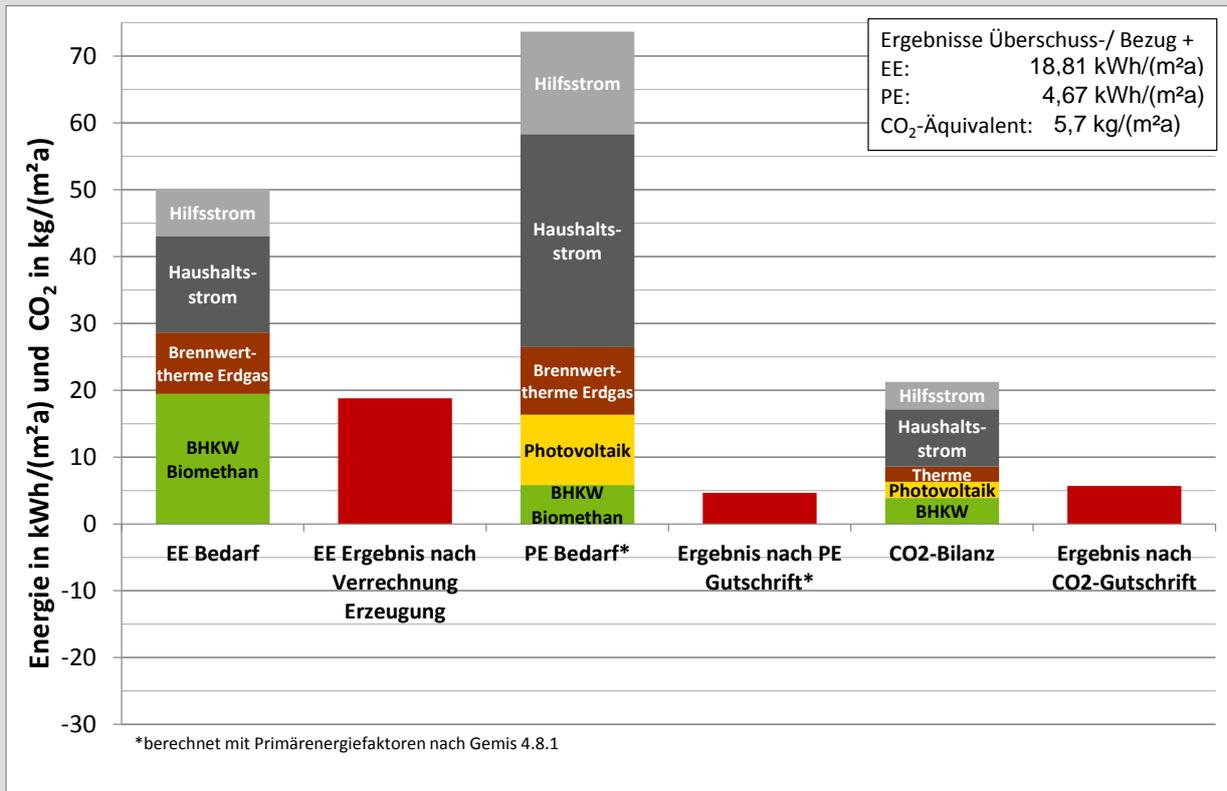


Bild 36: Einsatz von BHKW, Solarthermie und Spitzenlastkessel: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO₂-Emissionen

4.2.3 Wärmepumpe

Als nächste Anlagentechnik wird der Einsatz einer Wärmepumpe für das Projekt Cordierstraße 4 betrachtet. In Betracht gekommen wäre für die Cordierstraße 4 der Einsatz einer Sole/Wasser- oder Wasser/Wasser-Wärmepumpe. Aufgrund des hohen Grundwasserspiegels in der Cordierstraße 4 wäre dies vermutlich umsetzbar gewesen. Für die Betrachtung der Wärmepumpe wird eine Jahresarbeitszahl von 3,7 angenommen. Die Studie „Wärmepumpen Effizienz“ des Fraunhofer ISE (vgl. [Miara et al. 2011]) zeigt anhand von Messwerten, dass Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen bei optimierten Systemen hinsichtlich Anlagentechnik und Vorlauftemperatur für Heizung und Warmwasser in Einfamilienhäusern eine Jahresarbeitszahl von ca. 3,7 erreichen. Ob dies so auch für Mehrfamilienhäuser angenommen werden kann, ist fraglich. An dieser Stelle soll jedoch zuerst einmal die Energiebilanz anhand dieser Effizienz der Wärmepumpe betrachtet werden, im Anschluss werden Parametervariationen zu verschiedenen Jahresarbeitszahlen vorgenommen.

Grundlage der Berechnungen ist das gleiche zuvor dargestellte Gebäude mit dem identischen Bedarf an Wärme und elektrischer Energie. Angenommen wird eine auf die Nutzung der Wärmepumpe optimierte Anlagentechnik, um eine möglichst gute Effizienz zu erreichen. Die bisher für die solarthermische Anlage genutzte Dachfläche wird für diese Betrachtung für die Installation zusätzlicher Photovoltaik-Module genutzt, die elektrische Energieerzeugung durch Photovoltaik steigt daher.

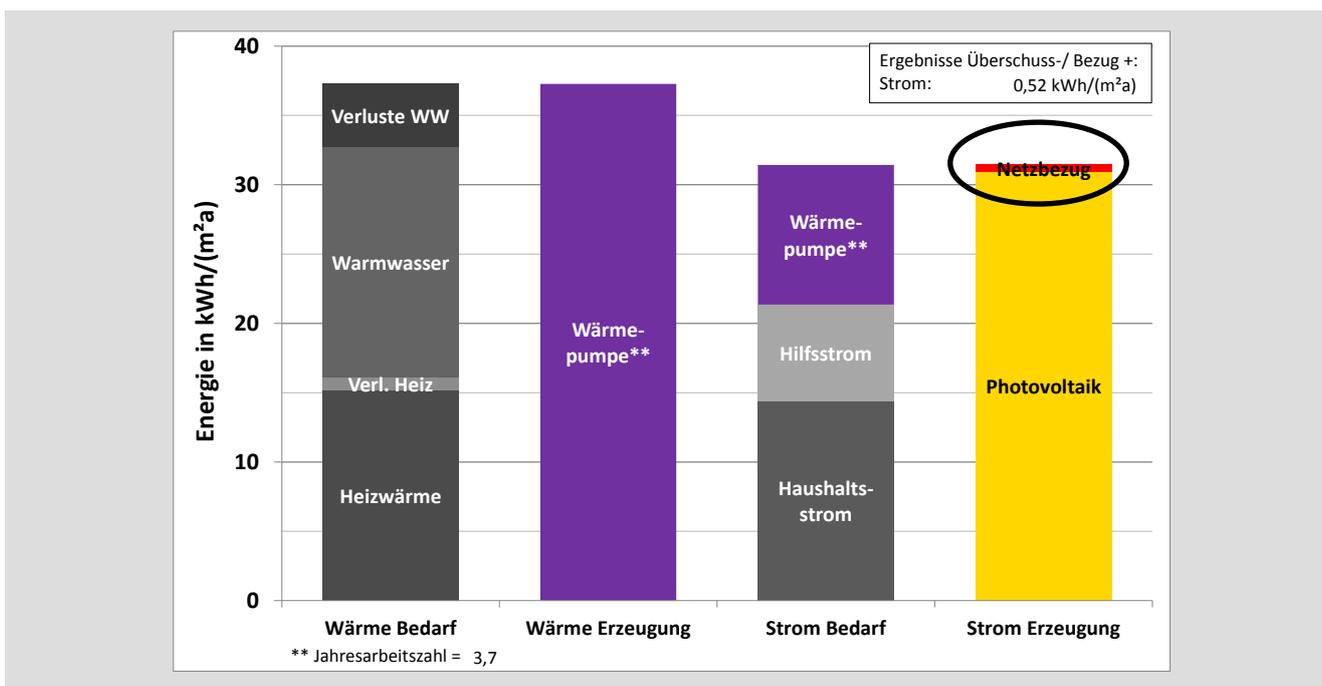


Bild 37: Einsatz einer Wärmepumpe: Energiebedarf und -erzeugung

Aus der Darstellung in Bild 37 wird ersichtlich, dass die Energieerzeugung am Gebäude nicht ausreicht um die für die Wärmepumpe benötigte elektrische Energie in der Jahresbilanz bereitzustellen. Daher wäre das Gebäude alleine schon in dieser Hinsicht kein Gebäude mit Energieüberschuss, da 0,52 kWh/(m²a) aus dem Netz bezogen werden müssen. Auch bei den Bilanzergebnissen (vgl. Bild 38) zeigt sich, dass kein bilanzieller Überschuss mehr erreicht werden kann. Das Gebäude erreicht einen Primärenergiebedarf von 14,65 kWh/(m²a). Um mit einer Wärmepumpe in dem Projekt Cordierstraße 4 einen Energieüberschuss erreichen zu können, müsste daher eine deutlich größere solare Energieerzeugung möglich sein.

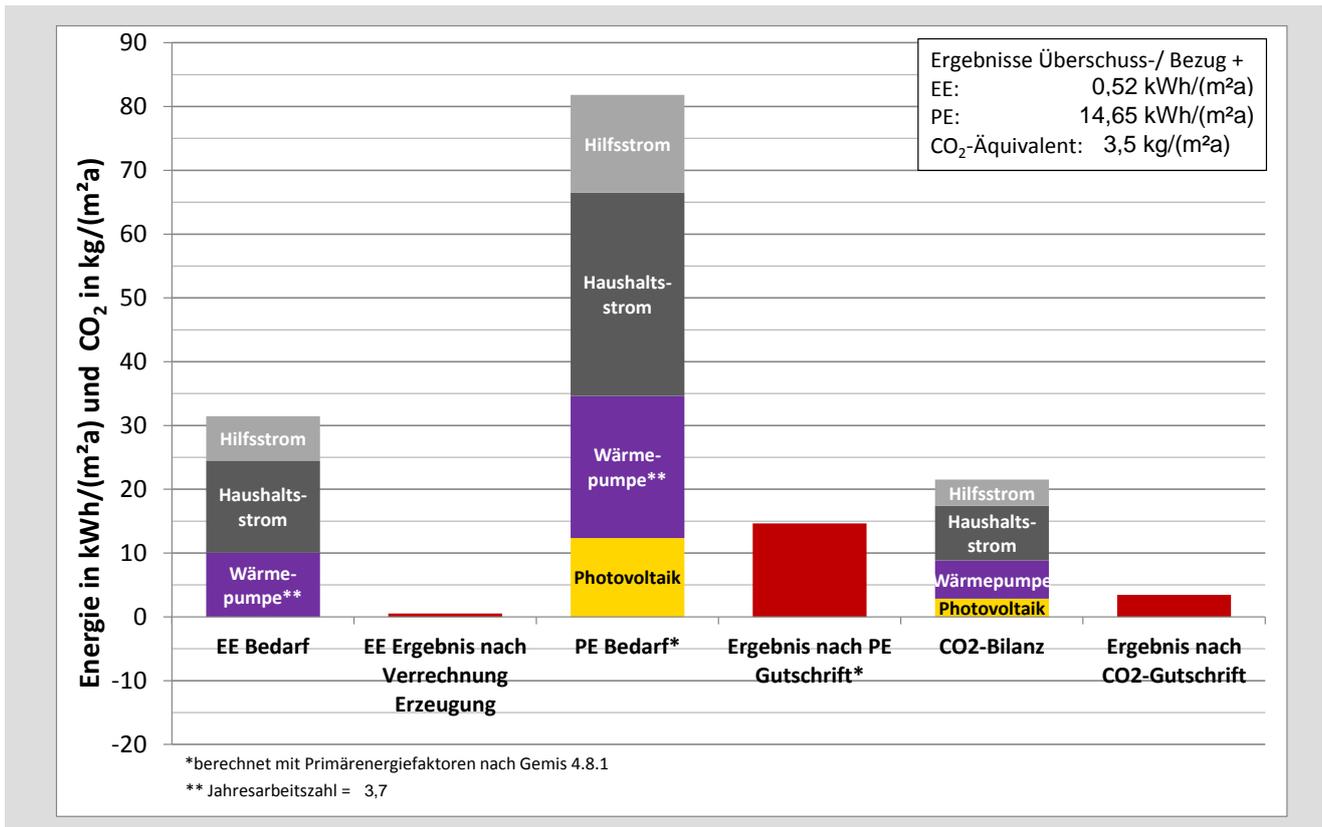


Bild 38: Einsatz einer Wärmepumpe: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO₂-Emissionen

Die hier dargestellten Ergebnisse gehen von einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 3,7 aus. Gegebenenfalls kann dies jedoch in einem Mehrfamilienhaus nicht erreicht werden, bedenkt man z. B. dass die Vorlauftemperatur der Heizung aufgrund der größeren Rohrleitungslängen und Verluste vermutlich nicht so stark abgesenkt werden kann wie in einem Einfamilienhaus. Können keine sehr niedrigen Vorlauftemperaturen erreicht werden, sinkt die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe rapide.

Bild 39 zeigt die Bilanzergebnisse bezogen auf den mit sinkender Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe steigenden gesamten Strombedarf des Gebäudes (inklusive Haushalts- und Hilfsstrom) in kWh/(m²a). Die größten Auswirkungen hat eine geringere Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe auf den Primärenergiebedarf, dieser steigt mit sinkender Jahresarbeitszahl stark an. Auch die Werte des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen steigen.

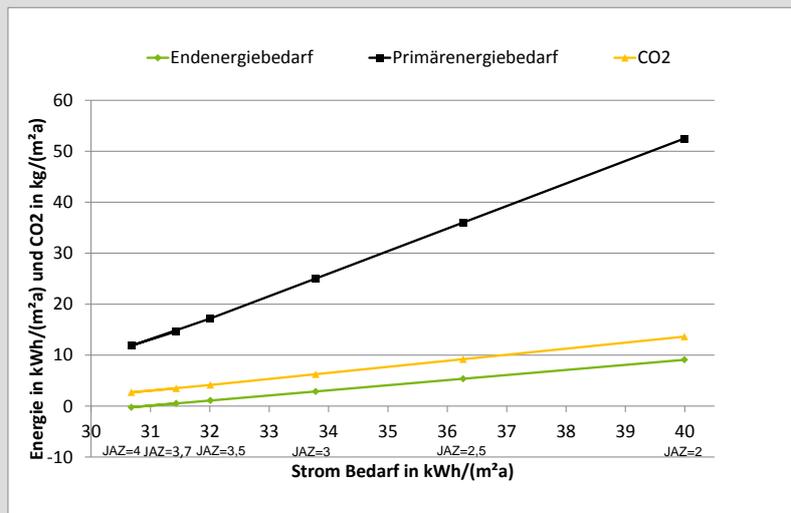


Bild 39: Einsatz einer Wärmepumpe: Bilanzergebnisse abhängig von der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Zu beachten ist, dass nicht nur die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes im Betrieb hat, sondern zusätzlich auch das Nutzerverhalten. Selbst bei der zuvor angenommenen Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3,7 verschlechtert sich, analog der vorherigen Betrachtung, die primärenergetische Bilanz mit steigendem Wärmebedarf des Gebäudes im Betrieb durch erhöhte Innentemperaturen oder erhöhten Warmwasserbedarf am stärksten.

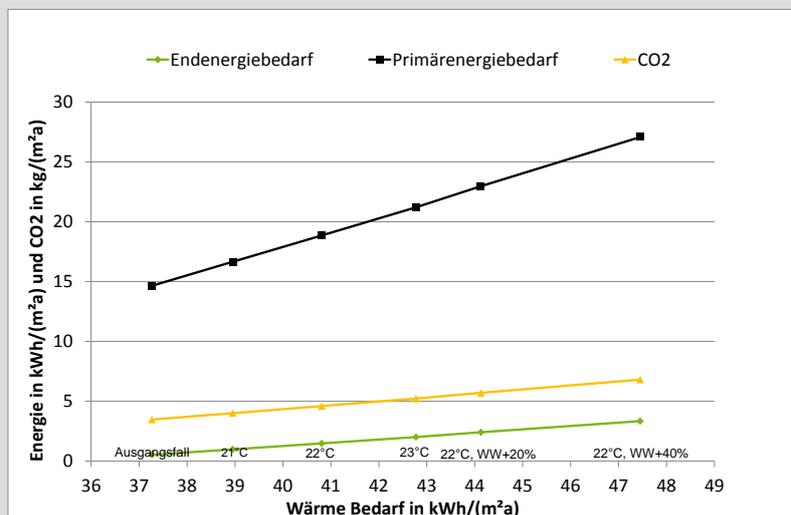


Bild 40: Einsatz einer Wärmepumpe: Bilanzergebnisse abhängig vom Nutzerverhalten bei einer Jahresarbeitszahl von 3,7

Beide Einflüsse zusammen, die der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und des Nutzerverhaltens in Bezug auf den elektrischen Energiebedarf des Gebäudes, sind in Bild 41 dargestellt.

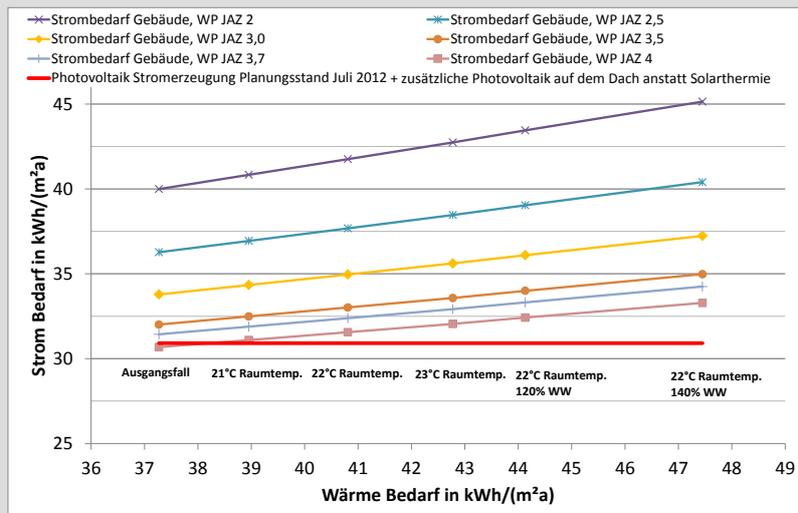


Bild 41: Einsatz einer Wärmepumpe: Strombedarf des Gebäudes abhängig von Nutzerverhalten und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Zusätzlich zu den Kennlinien zum Strombedarf des Gebäudes ist in Bild 41 die Stromerzeugung des Gebäudes (rote Linie) eingezeichnet. Klar ersichtlich ist, dass für das Projekt Cordierstraße 4 nur mit einer sehr hohen Jahresarbeitszahl die durch die Photovoltaik bereit gestellte elektrische Energie in der Jahresbilanz für einen Ausgleich ausgereicht hätte. Unter Annahme der sich vermutlich einstellenden Raumtemperaturen zwischen 22-23 °C würde das Gebäude im Betrieb keinen Überschuss erreichen.

Zusätzlich wird aus Bild 41 ersichtlich, dass für die erfolgreiche Umsetzung von Konzepten auf Basis von Wärmepumpen alleine die elektrische Energieerzeugung durch Photovoltaik ausschlaggebend ist. Hier zeigt sich der bereits beschriebene Zusammenhang, dass mit steigender Wohnfläche pro m² nutzbarer Fläche zur solaren Energieerzeugung mit Photovoltaik es immer schwieriger wird, einen Energieüberschuss zu erreichen: Während in Einfamilienhäusern mit großer Dachfläche im Verhältnis zur Wohnfläche große Photovoltaikflächen mit preisgünstigen Modulen und geringen Wirkungsgraden ausreichen, um einen Energieüberschuss zu erreichen, wird dies im Mehrfamilienhaus aufgrund der geringeren zur Verfügung stehenden Flächen schwieriger, und es müssen Module höherer Effizienz eingesetzt werden oder zusätzlich Flächen für die Nutzung von Photovoltaik erschlossen werden.

4.2.4 Solarthermie und Wärmepumpe

Als weitere Variante wird nun die Nutzung einer solarthermischen Anlage in Kombination mit einer Wärmepumpe dargestellt. Je nach Anlagenhydraulik können sich aus der Kombination dieser beiden Techniken Effizienzvorteile für die Wärmepumpe und/oder die solarthermische Anlage ergeben. Für die solarthermische Anlage können sich z. B. höhere solare Kollektorserträge durch längere Betriebszeiten aufgrund des durch die Wärmepumpe benötigten geringeren Temperaturniveaus ergeben. Auf Seiten der Wärmepumpe kann z. B. bei Nutzung der solarthermischen Anlage zur Erhöhung der Wärmequellentemperatur der Wärmepumpe eine Steigerung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe bewirkt werden. Hier gibt es sehr viele verschiedene Anlagenkonfigurationen, die solarthermische Anlage wird für gewöhnlich als vorrangige Wärmequelle genutzt (vgl. [Loose 2012]).

Häufiger werden Konzepte umgesetzt, bei denen die Wärmepumpe parallel als zusätzliche Wärmequelle zur solarthermischen Anlage dient, also keine direkten wechselseitigen Wirkungen zwischen solarthermischer Anlage und Wärmepumpe auftreten. Eine solche Anlagenkonfiguration und ihre Auswirkungen auf das Passivhaus mit Energiegewinn werden im Folgenden betrachtet.

Bild 42 zeigt die Ergebnisse der Deckung des Energiebedarfs mit dieser Anlagentechnik. Die elektrische Energieerzeugung aufgrund der teilweise durch die solarthermische Anlage ersetzten Photovoltaikfläche gesunken, es werden bei diesem Konzept 1,64 kWh/(m²a) aus dem elektrischen Netz bezogen. Die Kombination von solarthermischer Anlage und Wärmepumpe ist in diesem Fall nicht wesentlich schlechter (vgl. Bild 43) als der alleinige Einsatz von Wärmepumpe und Photovoltaik.

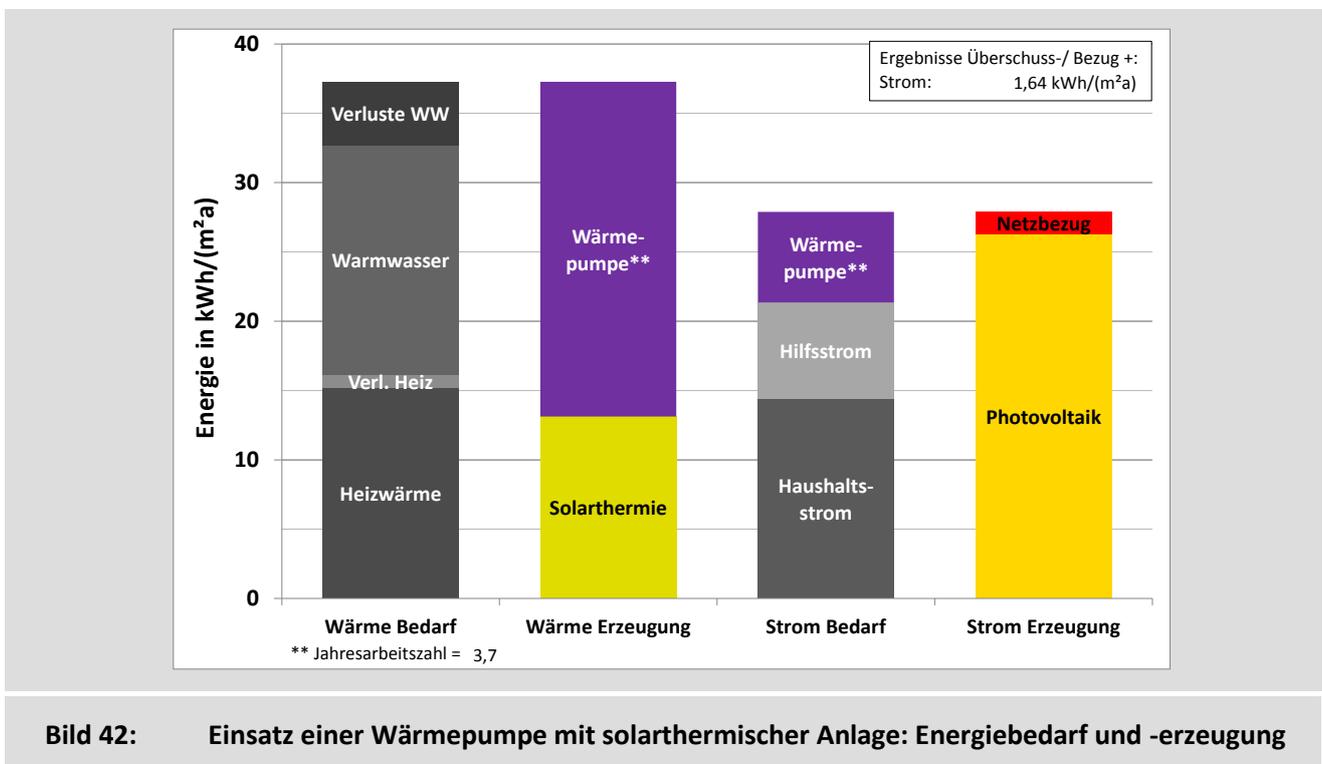


Bild 42: Einsatz einer Wärmepumpe mit solarthermischer Anlage: Energiebedarf und -erzeugung

Ob hier Vorteile entstehen, ist maßgeblich von der Flächeneffizienz, d. h. der Nutzung effizienter Komponenten und der effizienten Ausnutzung der Dachfläche, abhängig. In dem hier dargestellten Fall stehen hocheffiziente CPC-Röhrenkollektoren in Konkurrenz zur Nutzung hocheffizienter Photovoltaikmodule mit Wirkungsgrad von 17,7 %. Wird der Vergleich z. B. zwischen Flachkollektoren und effizienten Photovoltaikmodulen vorgenommen, ergibt sich ein großer Vorteil für die Photovoltaikanlage. Wird der CPC-Röhrenkollektor mit gewöhnlichen Photovoltaikmodulen mit Wirkungsgrad von z. B. 14 % verglichen, ergibt sich ein Vorteil für die solarthermische Anlage. Schließlich kann davon ausgegangen werden, dass die beiden Konzepte „nur-Strom“ und Kombination von solarthermischer Anlage und Wärmepumpe ähnliche Ergebnisse erzielen, wenn eine vergleichbare Flächeneffizienz für die solarthermische Anlage und die Photovoltaikanlage erreicht werden kann.

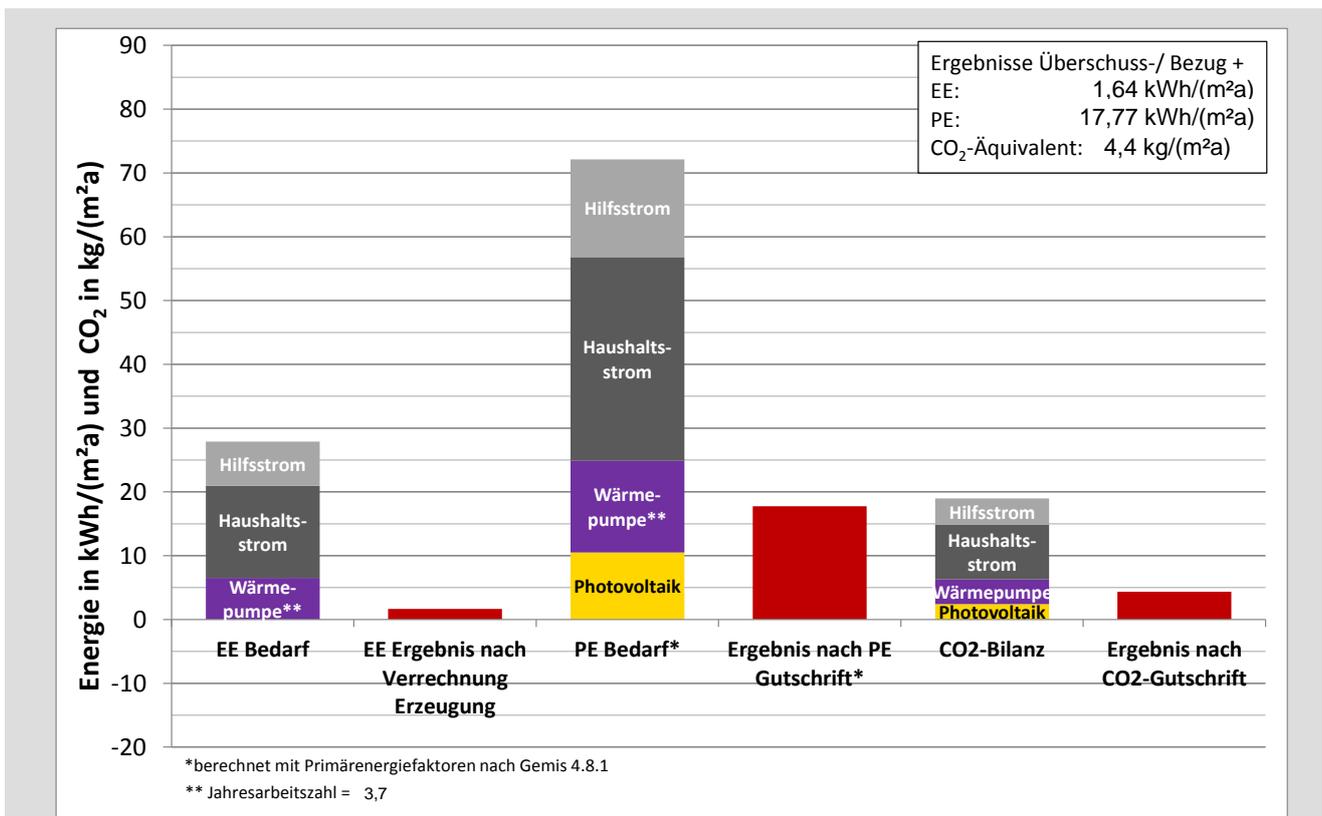


Bild 43: Einsatz einer Wärmepumpe mit solarthermischer Anlage: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO₂-Emissionen

4.3 Stromerzeugung

Eine möglichst hohe Stromerzeugung am und im Gebäude ist essentieller Baustein zur Erreichung des Energiegewinns. Die Stromerzeugung wird einerseits benötigt, um den Haushalts- und Hilfsstrombedarf zu decken. Andererseits muss die Stromerzeugung zusätzlich den Energieeinsatz der Wärmeerzeugung decken, im Fall des Einsatzes einer Wärmepumpe in Form von elektrischer Energie oder bei Einsatz eines regenerativen Brennstoffes um diesen zu kompensieren. In diesem Kapitel wird die Stromerzeugung des Projektes Cordierstraße 4 dargestellt.

4.3.1 Photovoltaik

Die Photovoltaik-Fläche ist analog zu Einfamilienhäusern, die als Gebäude mit Energieüberschuss gebaut werden, auch bei Mehrfamilienhäusern der entscheidende Faktor für eine positive Energiebilanz. Im Vergleich zu einem Einfamilienhaus ist die Erreichung dieses Zieles jedoch deutlich schwerer: Wie bereits beschrieben steht weniger (Dach-)Fläche für die solare Energieerzeugung pro m² Wohnfläche zur Verfügung. Gleichzeitig ist der Bedarf an elektrischer Energie pro m² Wohnfläche in einem Mehrfamilienhaus aufgrund der kleineren Wohnungen und meist höheren Bewohnerdichte typischerweise höher als in einem Einfamilienhaus. Zusätzlich kommen am Standort ggf. weitere ungünstige Randbedingungen hinzu. In der Cordierstraße 4 sind dies z. B. die nicht optimale Ausrichtung des Gebäudes (vgl. Bild 2) und die Verschattung durch umliegende Gebäude und Baumbestand (vgl. Bild 44).

Die Auswirkungen des Baumbestandes in der Cordierstraße 4 konnten im Rahmen der Planungsphase immer nur vermutet werden, da keine detaillierten Betrachtungen zur Verschattungssituation vor Abriss des Gebäudes durchgeführt werden konnten. Auf der Südwestseite des Gebäudes steht eine große Rotbuche (vgl. Bild 44), bei der bis zum Bau des letzten Stockwerks unklar war, ob sie die Dachfläche verschatten würde. Im Laufe der Bauphase zeigte sich jedoch, dass das Gebäude etwas höher ist, als die Rotbuche. Durch diesen Baumbestand war jedoch bereits zu Beginn des Projektes klar, dass die Westseite des Gebäudes (-65° Abweichung zu Süd) nicht zur Energieerzeugung durch eine Photovoltaik-Anlage an der Fassade genutzt werden kann. An der Südfassade soll jedoch eine Photovoltaik-Anlage installiert werden. Diese Fassade wird nur in den Nachmittag- bis Abendstunden von der Rotbuche verschattet. Hier ist jedoch deutlich mehr Verschattung durch das gegenüberliegende Gebäude zu erwarten. Die Verschattungssituation wurde möglichst exakt abgeschätzt und in den Simulationen des Photovoltaikertrages berücksichtigt.



Bild 44: Verschattung durch Baumbestand: links: Blick auf die Westseite des Gebäudes, rechts Blick auf die Südseite

Die Planung der Photovoltaikanlage in der Cordierstraße 4 wurde mehrmals verändert. Zum einen aufgrund von Entwicklungen in der Photovoltaikbranche, die neue Möglichkeiten boten, wie z. B. hocheffiziente Module mit Wirkungsgraden von 17-20 % oder neuen Aufständersystemen und nicht zuletzt der Verringerung der Modulkosten, die zusätzliche Nutzungsvarianten interessanter werden ließen. Zum anderen, da nach und nach eine immer effizientere Nutzung der verfügbaren Flächen möglich wurde. Schließlich sollte das Projekt die Anforderungen des BMVBS an Wohngebäude im Plus-Energiehaus-Standard erfüllen und auch hierzu war eine Steigerung des Ertrages aus der Photovoltaik-Anlage notwendig. Im Folgenden wird die Entwicklung der Planung der Photovoltaikanlage und die sich daraus ergebenden Ertragssteigerungen kurz beschrieben. In die dargestellten Vorschläge zur Erhöhung des Photovoltaikertrages flossen die Interessen und Erfahrungen aller Projektpartner mit ein, so wurden die Vorschläge unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten, der gestalterischen und sicherheitstechnischen Randbedingungen und der Kosten betrachtet.

Bild 45 zeigt den Planungsstand von 2011 bis Juli 2012. Zu diesem Zeitpunkt waren vier Photovoltaik-Anlagen geplant, genutzt werden sollten alle verfügbaren Flächen, die eine Aussicht auf solare Erträge hatten. Genutzt werden sollte daher das Dach, der Carport, die Südfassade sowie das Treppenhaus. Alle Module wurden in Südausrichtung (aufgrund der Ausrichtung des Gebäudes mit 25° Abweichung Richtung Osten) aufgeständert, bzw. direkt an der Fassade angebracht. Ca. 2/3 der Dachfläche wurde für die Photovoltaik vorgesehen, 1/3 für die solarthermische Anlage. Auf dem Carport wurde eine Modulreihe aufgeständert. Auf dem Dach, Carport und an der Fassade wurden Module mit einem Wirkungsgrad von ca. 15 % vorgesehen, am Treppenhaus semi-transparente Module mit ca. 5 % Wirkungsgrad. Der Ertrag der Anlage lag insgesamt bei 26.200 kWh/a. Dies erreichte die Zielsetzungen nicht.

Um die Photovoltaik-Erzeugung weiter zu erhöhen wurde vorgeschlagen die komplette Dachfläche des Carports zu nutzen, das Dach leicht schräg zu stellen und mit Modulen zu belegen. Genutzt werden sollten hier weiterhin die Module mit 15 % Wirkungsgrad. Aufgrund der höheren Kosten entfiel die Photovoltaikanlage am Treppenhaus, die ohnehin aufgrund der hohen Verschattung und des geringen Wirkungsgrades der Module nur sehr geringe Erträge versprach. Für diesen Vorschlag der Anlagenkombination wurde ein Ertrag von 32.100 kWh/a prognostiziert.

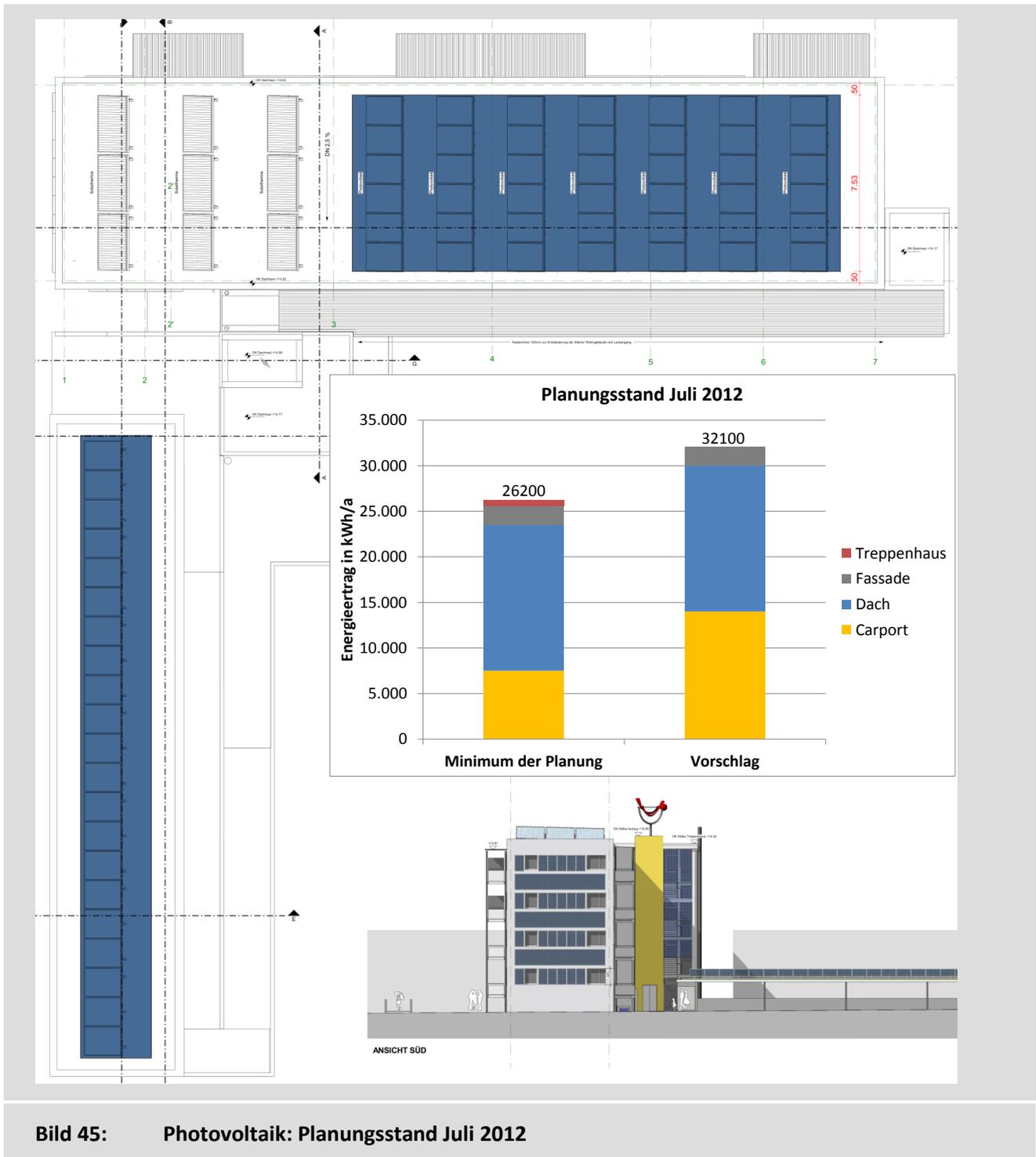


Bild 45: Photovoltaik: Planungsstand Juli 2012

Bis zum Januar 2013 (vgl. Bild 46) traten einige Änderungen ein. So wurde der vorstehend beschriebene Vorschlag angenommen und das Carportdach komplett mit Photovoltaik belegt und eine weitere Ertragssteigerung auf dem Dach durch Nutzung einer Ost-/West-Aufständigung der Photovoltaikanlage betrachtet. Zusätzliche Randbedingung war die Installation eines Sekuranten-Systems auf dem Dach, das durch Wartungspersonal bei Arbeiten auf dem Dach zur Absicherung der Personen genutzt werden soll. Dadurch wurde die zur Energieerzeugung nutzbare Dachfläche weiter reduziert, dies ließ sich jedoch mit den neuen angedachten Komponenten gut vereinbaren. Wesentlichen Anteil an dieser optimierten Planungslösung für die Nutzung des Daches hat das erfahrene Planungsteam von faktor10. Im Projektverlauf zeigte sich wei-

terhin, dass die Fassaden-Anlage im Vergleich zu den vermutlich erzielbaren Energieerträgen sehr teuer war, so dass zeitweise unklar war, ob und in welcher Größe eine Fassaden-Anlage installiert werden kann.

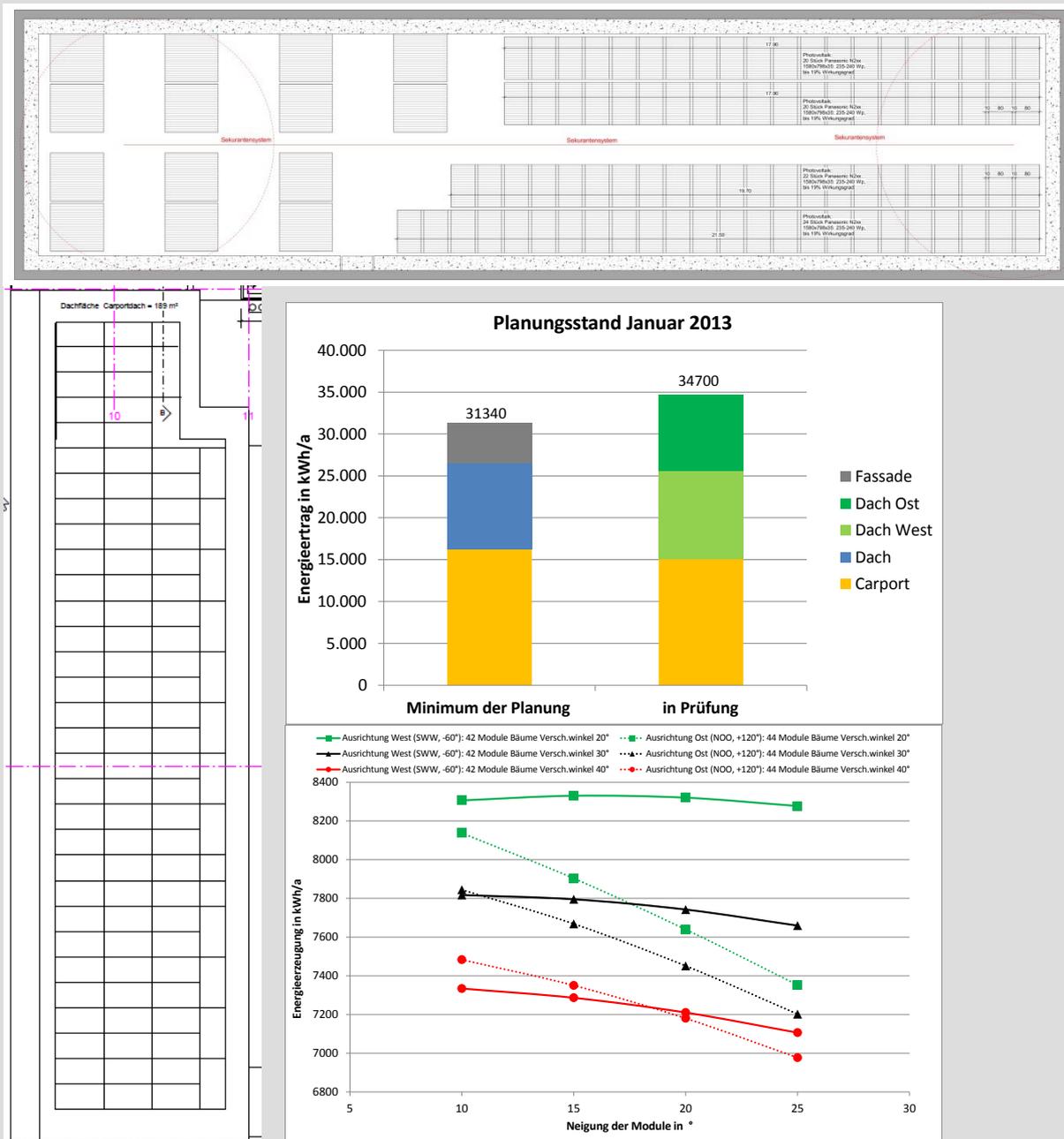


Bild 46: Photovoltaik: Planungsstand Januar 2013

Für die Ost-West-Ausrichtung der Module auf der Dachfläche wurden abhängig von der Verschattung und der Neigung der Module Parameterstudien zu dem sich vermutlich ergebenden Energieertrag durchgeführt (vgl. Bild 46 unten rechts). Es zeigt sich, dass für den speziellen Fall der Cordierstraße 4 aufgrund der leicht nach Osten abweichenden Ausrichtung des Gebäudes die nach Osten ausgerichteten Module etwas Richtung Nordost ausgerichtet sind und dadurch mit steigender Neigung der jährliche Energieertrag stark abnimmt. Daher wurde hier eine möglichst geringe Neigung empfohlen. Um gleichzeitig jedoch die Selbststrei-

nigung der Module bei Regen sicherzustellen, wurde eine Neigung von 10-15° angestrebt. Aufgrund des neuen Vorschlages kann der Energieertrag der Anlage auf 36.000 kWh/a gesteigert werden.

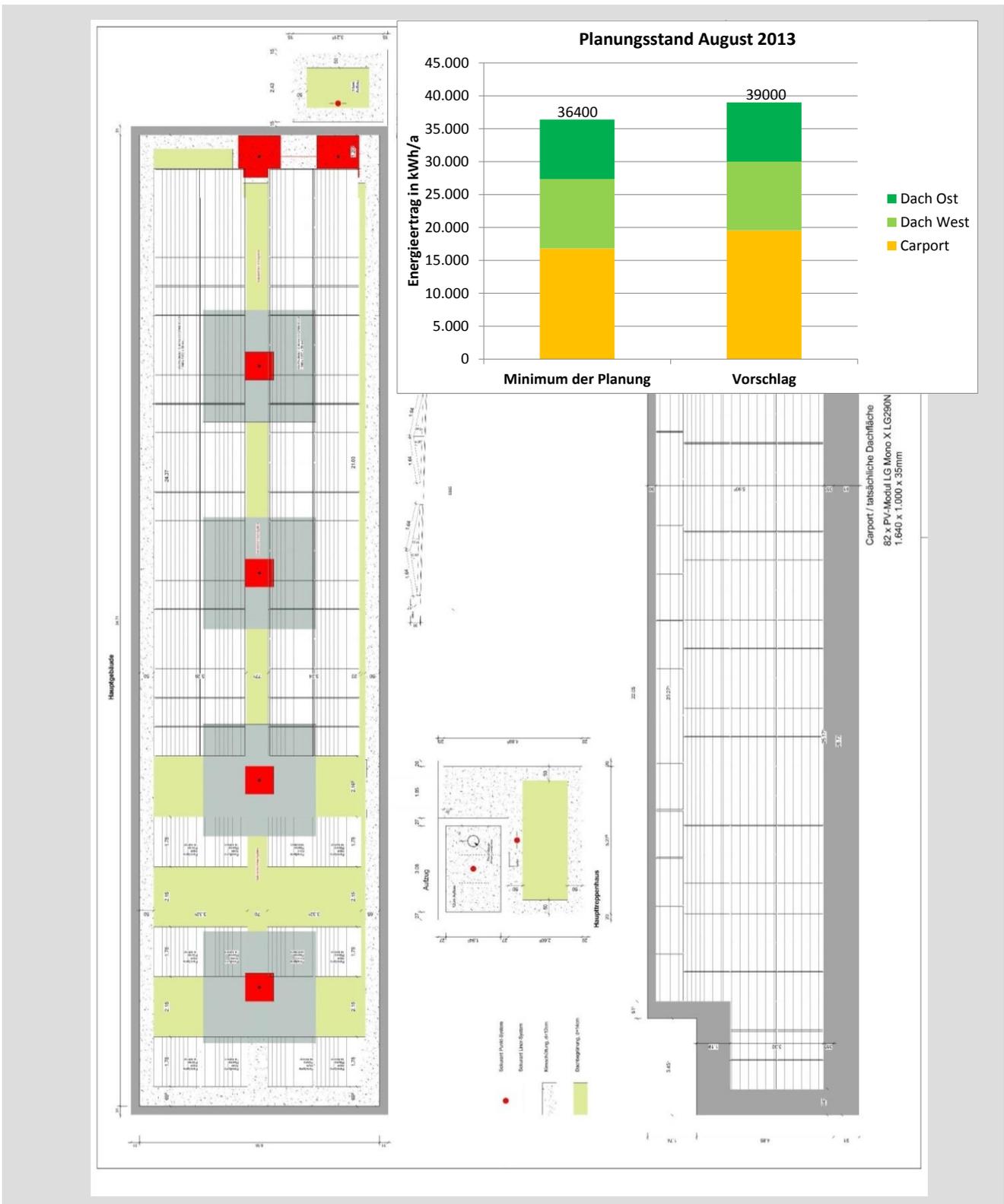


Bild 47: Photovoltaik: Planungsstand August 2013

Die Ertragssteigerung zum Planungsstand August 2013 (vgl. Bild 47) zum weiteren Vorschlag beruht zum einen Teil darauf, dass die Fläche der solarthermischen Anlage aus hydraulischen Gründen aufgrund der Empfehlung des Herstellers um 2 Kollektoren verringert wurde, zum anderen wurden PV-Module mit höherem Wirkungsgrad genutzt.

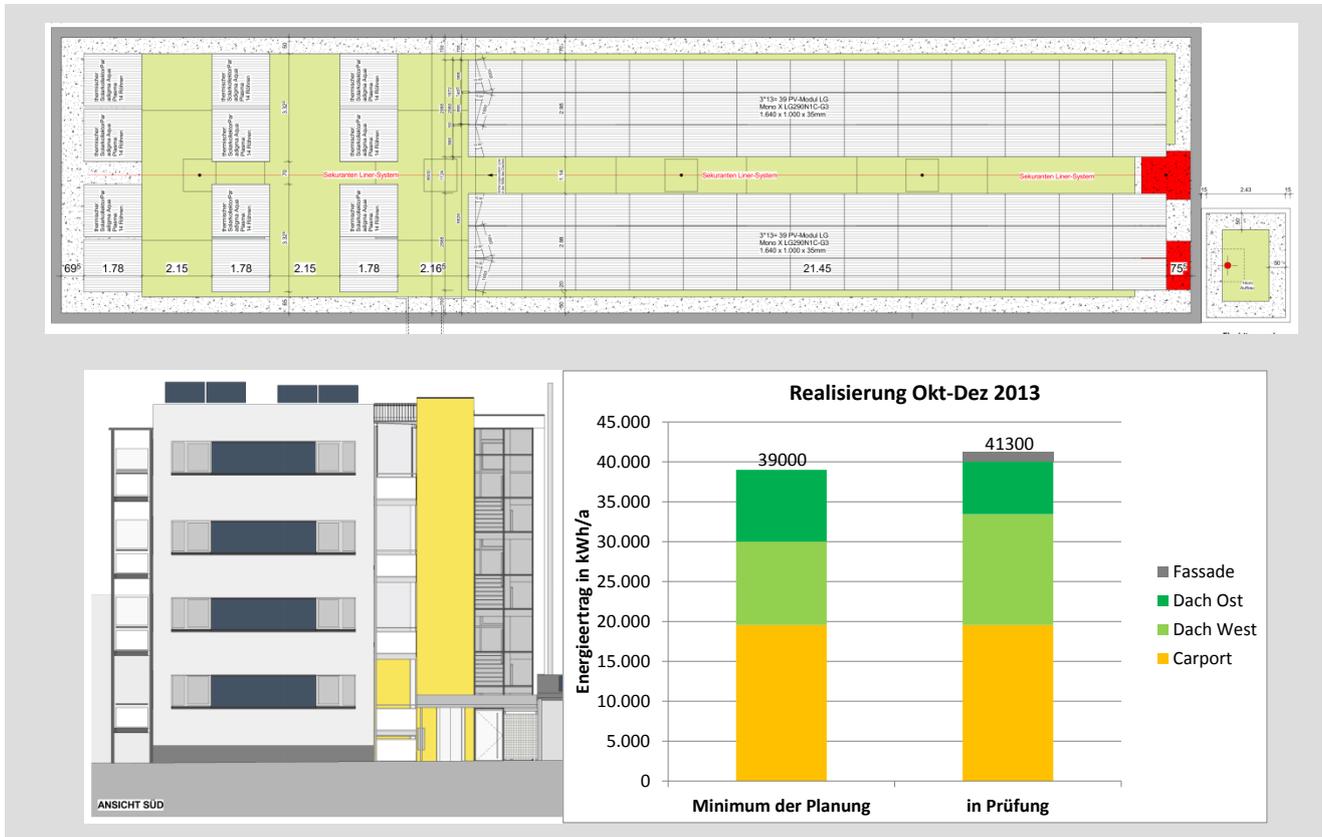


Bild 48: Photovoltaik: Realisierung Oktober-Dezember 2013

Bild 48 zeigt den Planungsstand Oktober 2013, der in leicht abgewandelter Form umgesetzt wird. Im Vergleich zu den vorherigen Planungsständen wurden die Module nun, im Vergleich zur vorherigen Planung um 90° gedreht und längs auf dem Dach installiert, davon 4 Reihen nach West (-65°) ausgerichtet und 2 Reihen nach Ost (115°) ausgerichtet. In Tabelle 12 ist die Aufteilung der installierten Leistung von insgesamt 49,68 kWp auf die einzelnen Anlagen dargestellt.

Tabelle 12: Leistung der Photovoltaik-Anlagen

Anlage	Anzahl Module	Leistung in kWp	Ausrichtung (W -90°; S 0°; O +09°)	Neigung
Dach Ostausrichtung	28	8,12	115°	15°
Dach Westausrichtung	52	15,08	-65°	15°
Carport	82	23,78	25°	10°
Fassade	8	2,7	25°	90°

Dadurch konnte der Energieertrag weiter gesteigert werden. Zusätzlich wird vermutlich eine kleine Photovoltaikanlage an der Fassade installiert, die den Energieertrag noch etwas erhöht, so dass nach Fertigstellung des Gebäudes mit einem Ertrag von ca. 41.000 kWh/a gerechnet werden kann. Bild 49 zeigt die auf dem Dach ausgeführte Installation der Module in Ost-/West Ausrichtung in der Cordierstraße 4. Weitere Änderungen zur oben abgebildeten Planung sind die Einhaltung eines Abstandes von ca. 30 cm zwischen den Modulreihen an der Stelle, an der sich zwei Module treffen. Dieser wurde vorgeschlagen, um eine leichtere Wartung und Reinigung der Module vornehmen zu können und um den Belag der Module mit Schnee und Laub zu reduzieren, indem dieser in den Zwischenraum zwischen den Modulen abrutschen kann.



Bild 49: Photovoltaik in Ost/West-Ausrichtung auf dem Dach Cordierstraße 4

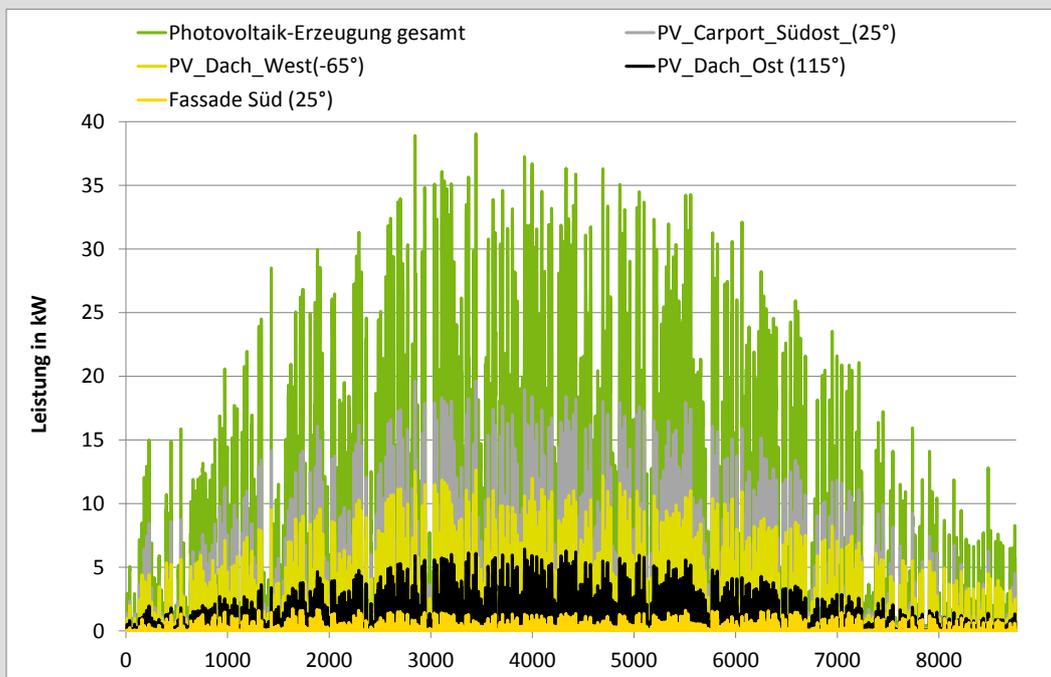


Bild 50: Simulationsergebnisse zur Energieerzeugung der Photovoltaik Cordierstraße 4

Bild 50 zeigt den simulierten Ertrag der Photovoltaikanlagen über das Jahr. Es wird ersichtlich, dass zu keinem Zeitpunkt die maximale installierte Leistung erzeugt wird. Dies ist unter anderem in der unterschiedlichen Ausrichtung der Anlagen bei unterschiedlichen Neigungen und unterschiedlicher Verschattung begründet. Zusätzlich sind in der Darstellung die Erträge auf Wechselstromseite dargestellt, so dass hier die Effizienz der Wechselrichter mit berücksichtigt ist. Des Weiteren ist bei dieser Betrachtung im Vergleich mit der installierten kWp Leistung der Module zu beachten, dass Standardtestbedingungen (1000 W/m^2 , Modultemperatur $25 \text{ }^\circ\text{C}$) in der Praxis nur selten erreicht werden können.

Vorteil der unterschiedlichen Ausrichtungen der Anlagen ist, dass die maximale elektrische Energieerzeugung der einzelnen Anlagen am Tag nicht zur gleichen Zeit, sondern jeweils aufgrund der Ausrichtung und Neigung leicht verschoben auftritt (vgl. Bild 51). Dargestellt ist hier die elektrische Energieerzeugung durch Photovoltaik an einem durchgängig sonnigen Sommertag. Zu sehen ist, dass die Anlage mit Ost-Ausrichtung (schwarz) zuerst die maximale Leistung erreicht, danach das Carport mit Südausrichtung (grau) und schließlich die West-Ausgerichtete Anlage (hellgrün). Die kleine Anlage an der Südfassade (gelb) wird einen Teil der Tages durch das gegenüberliegende Gebäude verschattet und erreicht daher nur einen geringen Ertrag. In Summe erreichen die Anlagen an diesem Tag eine maximale Photovoltaikleistung von $32,38 \text{ kW}$. Würden alle Anlagen zur gleichen Zeit Ihre Spitzenleistung erreichen, wäre diese um $3,5 \%$ höher. Durch die unterschiedliche Ausrichtung der Anlagen wurde die maximale erzeugte Leistung für die Cordierstraße 4 daher leicht reduziert und eine etwas gleichmäßigere Erzeugung in den Mittagsstunden erreicht. Mit steigender Neigung der Anlagen würde sich dieser Effekt weiter verstärken, dies ist jedoch nicht unbedingt empfehlenswert, da in diesem Fall der Gesamtertrag geringer ausfallen würde.

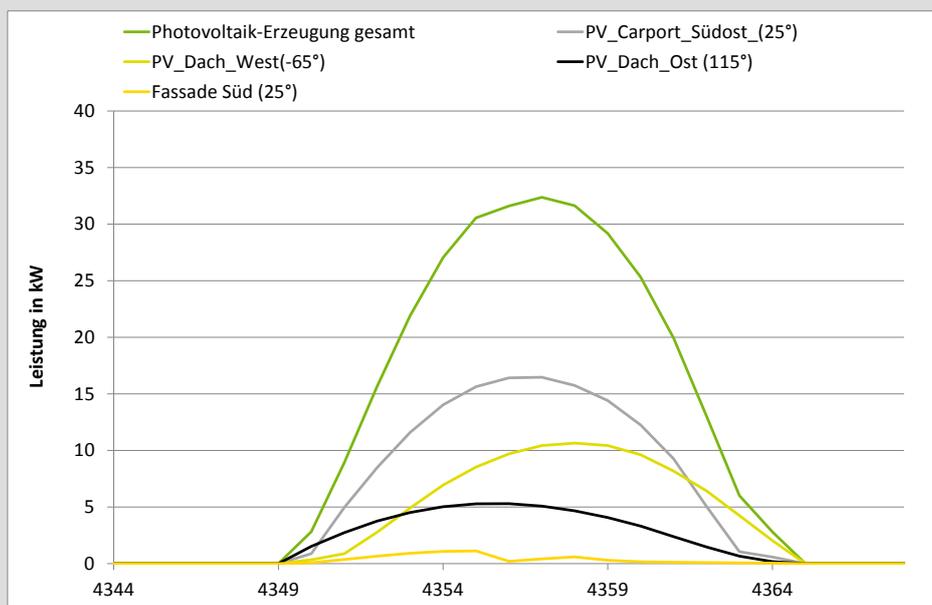


Bild 51: Simulationsergebnisse zur Energieerzeugung der Photovoltaik auf dem Dach, Tagesgang

4.3.2 BHKW

Das BHKW wird wärmegeführt betrieben, wurde aufgrund der benötigten Wärme ausgelegt und auf eine möglichst effiziente Brennstoffnutzung optimiert. Die Kennwerte des BHKWs sind in Tabelle 11 im Kapitel 4.2.1 dargestellt.

Stromkennzahl

Die Stromkennzahl stellt bei BHKWs die entscheidende Größe für die Stromproduktion dar und liegt bei dem vergleichsweise kleinen BHKW in der Cordierstraße 4 bei 0,41 gemäß Herstellerangabe. Dies ist für kleine BHKWs eine gute Kennzahl, größere BHKWs kommen hier jedoch auf deutlich höhere Werte. Zu beachten ist bei dieser Herstellerangabe der Stromkennzahl von 0,41 jedoch, dass sie auf die thermische Leistung des BHKWs von 12,3 kW ohne Kondensator bezogen ist, so dass das Verhältnis von Stromproduktion zu Wärmeleistung durch den eingesetzten Kondensator reduziert wird. Die Wärmeleistung des BHKWs steigt durch die Brennstoffnutzung von 12,3 kW um 2,3 kW auf 14,6 kW, der Gesamtwirkungsgrad steigt damit auf 100 % (64 % thermisch + 11 % durch den Kondensator + 26 % elektrisch) (bezogen auf den Heizwert des eingesetzten Biomethans). Die Stromkennzahl sinkt in diesem Fall rechnerisch von 0,41 auf 0,34. Auf der anderen Seite ist die Stromkennzahl aufgrund der ausgewählten BHKW-Variante Low NOx geringer als bei der Standard-Variante des Herstellers. Bedingt durch eine auf geringen Stickoxid-Ausstoß optimierte Verbrennung fällt die Stromproduktion des BHKWs mit 5 kW_{el} im Vergleich zur Standard-Variante mit 5,5 kW_{el} geringer aus. Für die Stromkennzahl bedeutet dies insgesamt, dass diese mit 0,34 um 23 % geringer ausfällt als die Stromkennzahl der Standardvariante. Für das Projekt Cordierstraße 4 wurde das BHKW jedoch vor allem unter dem Aspekt der bestmöglichen Nutzung des Biomethans ausgewählt.

Die beschriebene Stromkennzahl wirkt sich in diesem Fall nicht zwingend negativ auf die Wirtschaftlichkeit aus, denn ihr stehen zwei Vorteile gegenüber: Die maximale Leistung des BHKWs inklusive Kondensator mit 14,6 kW ist nach Angabe des Fachplaners groß genug für das Projekt Cordierstraße 4, um den gesamten Wärmebedarf im Winter decken zu können. Ohne den Kondensator wäre die Leistung des BHKWs nicht ausreichend gewesen, und es hätte ein größeres, teureres BHKW gewählt werden müssen, bei gleichzeitig niedrigerer Volllaststundenzahl. Zum anderen wird der vergleichsweise teure Brennstoff Biomethan durch den Kondensator bestmöglich ausgenutzt (Wirkungsgraderhöhung von 11 %), so dass auch hier eine leichte Kosteneinsparung für die benötigte Wärme zu erzielen ist.

Wärmegeführte vs. Stromgeführte vs. gemischte Betriebsweise

Das BHKW in der Cordierstraße 4 wird, wie beschrieben, wärmegeführt betrieben. Eine stromgeführte Betriebsweise wäre für dieses Projekt nicht zielführend gewesen, da in diesem Fall sehr wahrscheinlich die anfallende Wärme und somit auch der Brennstoff Biomethan nicht optimal genutzt worden wäre. Wie zuvor beschrieben, ist die optimale Brennstoffnutzung aus vielen Aspekten geboten, unabhängig davon wäre die Zielsetzung des Energiegewinns dadurch im Betrieb wahrscheinlich schwieriger zu erreichen gewesen. Die wärmegeführte Betriebsweise stellt zurzeit für das Projekt Cordierstraße 4 die optimale Betriebsweise dar.

In Zukunft ist jedoch zur weiteren Entlastung der elektrischen Netze eine gemischte Betriebsweise denkbar, so dass das BHKW bei Strombedarf diesen produziert falls die Photovoltaikanlage nicht genügend elektrische Energie liefert. Randbedingung wäre jedoch, dass das BHKW maximal so viel Wärme bereitstellt, wie es innerhalb des Tages hätte produzieren müssen. Aufgrund des primären Wärmeerzeugers im Projekt Cordierstraße 4 – der solarthermischen Anlage – ist für eine effiziente gemischte Betriebsweise jedoch eine sehr aufwändige Regelung notwendig, da das BHKW bei zu großer Wärmeerzeugung die Wärmeerzeugung der solarthermischen Anlage und somit ihre Effizienz verringern würde. Zusammenfassend heißt dies, das

BHKW müsste nachrangig nach solarthermischer Anlage und Photovoltaikanlage unter Einbeziehung von Tagesprognosen für die solarthermische Wärmezeugung in gemischter Betriebsweise geregelt werden.

Bild 52 zeigt die elektrische Energieerzeugung des BHKWs über das Jahr. Klar zu erkennen ist, dass aufgrund der solarthermischen Anlage das BHKW nur in der Übergangszeit und den Wintermonaten benötigt wird und so auch nur zu dieser Zeit elektrische Energie produziert.

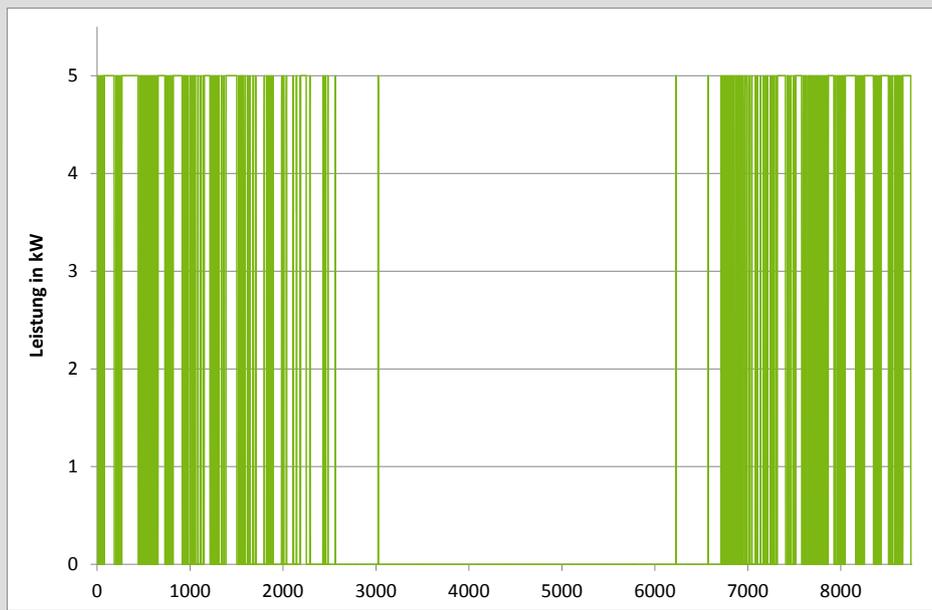


Bild 52: Simulationsergebnisse der elektrischen Energieerzeugung durch das BHKW für das Projekt Cordierstraße 4

Da das BHKW nur benötigt wird wenn – aufgrund fehlender solarer Einstrahlung – zu wenig solarthermische Wärme und analog wenig Photovoltaik-Strom produziert wird, ergänzen sich diese Anlagentechniken sehr gut, um eine über das Jahr ausgeglichene elektrische Energieerzeugung bereitzustellen. Dies, sowie die darüber hinausgehenden positiven Auswirkungen des Einsatzes eines elektrischen Energiespeichers auf den zeitlichen Ausgleich von Erzeugung und Bedarf, werden im folgenden Kapitel dargestellt.

4.4 Ausgleich von elektrischem Energiebedarf und –erzeugung - Elektrische Energiespeicher

Der Einsatz elektrischer Energiespeicher in Gebäuden wird zurzeit häufig bei großen Photovoltaik-Anlagen zur Erhöhung des Anteils des selbsterzeugten Stroms am Verbrauch diskutiert. Auch in der Cordierstraße 4 ist ein elektrischer Energiespeicher vorgesehen. Im Folgenden werden die in diesem Zusammenhang wichtigen Kennwerte kurz vorgestellt und Beispielrechnungen für das Projekt Cordierstraße 4 dargestellt. Die Beispielrechnungen basieren auf Simulationsdaten zur Erzeugung von Photovoltaik und BHKW und für das Gebäude in der Cordierstraße 4 angepasste Verbrauchsmesswerte zu Strom und Warmwasserbedarf. Es ergeben sich die in Bild 53 exemplarisch für den Sommer- und Winterfall dargestellten Last- und Erzeugungsprofile.

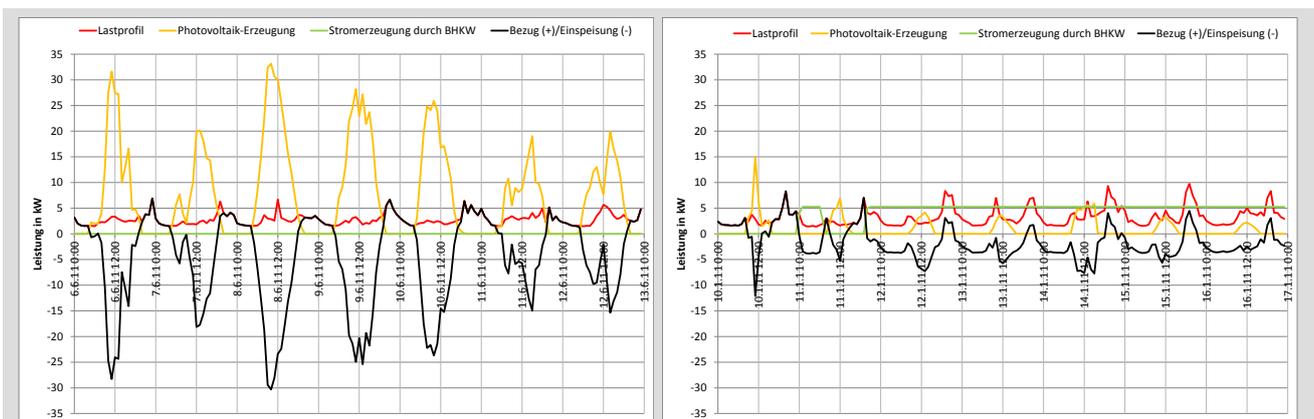


Bild 53: Last- und Erzeugungsprofil links: Sommer, rechts: Winter

Aus den Grafiken wird ersichtlich, dass der abendliche und nächtliche Stromverbrauch des Gebäudes aktuell nur gedeckt werden kann, wenn das BHKW in Betrieb ist. Ein Speicher könnte diesen Bedarf zu einem großen Teil abdecken, da der mittags durch die Photovoltaik erzeugte Strom oft hierfür ausreicht. Zuerst werden die dargestellten Lastprofile jedoch anhand von Kennwerten, vorerst ohne Einsatz eines elektrischen Energiespeichers, untersucht.

4.4.1 Kennwerte

Zur Bewertung des Einsatzes elektrischer Energiespeicher werden aktuell die Kennwerte Deckungsrate, Eigenverbrauch und Standardabweichung verwendet. Diese werden kurz vorgestellt und die Auswirkungen des Einsatzes elektrischer Energiespeicher auf den Kennwert dargestellt. Einen sehr großen Einfluss auf die Betrachtung hat das jeweils berücksichtigte Zeitintervall, daher wird auch hierauf kurz eingegangen.

Deckungsrate

Dieser Begriff wird aktuell von [Voss et al. 2011] genutzt, um den Einfluss von Netto-Nullenergiehäusern auf Netze zu charakterisieren. Die Berechnung erfolgt in Form von

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

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

Insbesondere das Zeitintervall i hat sehr großen Einfluss auf die berechnete Deckungsrate. Über diese Deckungsrate kann das saisonale, monatliche, tägliche oder noch genauer definierte Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Bedarf dargestellt werden. Häufig wird auch der Begriff Eigenbedarfsdeckung verwendet.

Wird die Deckungsrate zur Bewertung herangezogen, wird der Einsatz elektrischer Energiespeicher abhängig von ihrer Kapazität erst bei entsprechend kleinen Zeitschritten sichtbar. Zurzeit verfügbare Daten sind auf Stundenbasis vorhanden, diese werden für eine erste Betrachtung der Auswirkungen des Einsatzes eines Energiespeichers herangezogen. Auf dieser Basis kann jedoch lediglich die benötigte Kapazität, nicht aber die benötigte Leistung des Speichers beurteilt werden, da diese abhängig von den tatsächlich auftretenden Lastspitzen beurteilt werden muss, hierzu sind deutlich höher aufgelöste Daten notwendig.

Die monatliche Deckungsrate wird zurzeit für die Bilanzierung von Photovoltaik-Strom im Rahmen der EnEV in Verbindung mit der DIN V 18599 verwendet. Dies bedeutet, dass die maximal anrechenbare Stromerzeugung in den Sommermonaten auf den im entsprechenden Monat verbrauchten Strom begrenzt wird.

Für das Projekt Cordierstraße 4, welches elektrische Energie über die Nutzung von Photovoltaik und ein BHKW erzeugt, sind in Bild 54 links die mittleren Deckungsraten für unterschiedliche Zeitschritte dargestellt, hier vorerst ohne elektrischen Energiespeicher. Das rechte Bild zeigt zum Vergleich die Deckungsrate des Solar-Decathlon-Beitrages des Universität Wuppertal 2010.

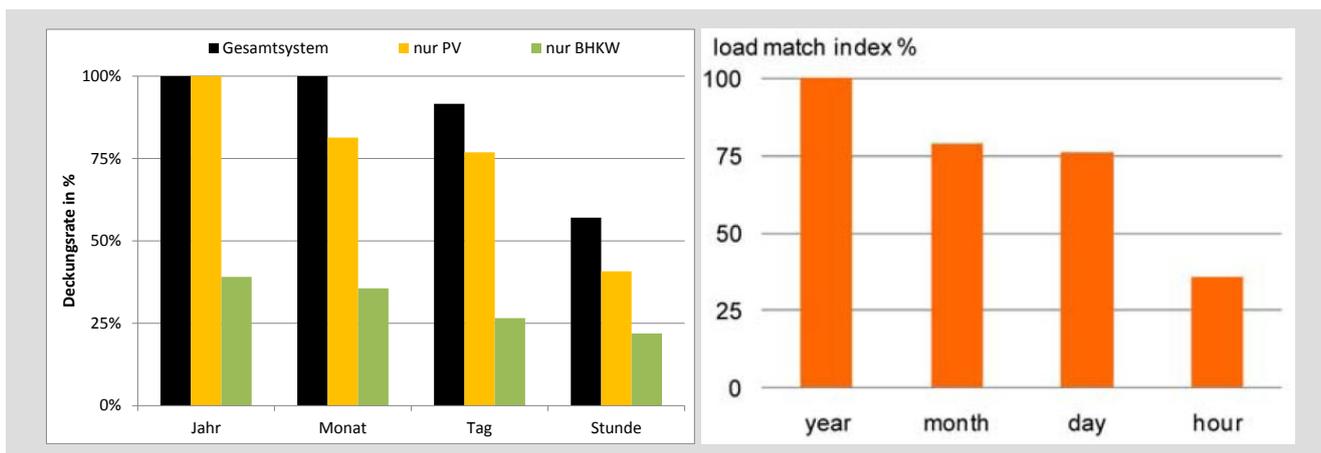


Bild 54: Jahresmittelwerte der Deckungsrate bei unterschiedlicher zeitlicher Auflösung links für das Gebäude in der Cordierstraße 4, rechts für das Gebäude der Universität Wuppertal zum Solar Decathlon 2010

Quelle: links: IWU, rechts: [Voss et al. 2011]

Die Betrachtung der Deckungsrate des Gesamtsystems im Vergleich zu den Deckungsraten bei alleiniger Nutzung einer Photovoltaik-Anlage oder eines BHKWs zeigt, wie gut sich diese Technologien ergänzen. Bei jährlicher Betrachtung unterscheiden sich die beiden Gebäude nicht und erreichen übereinstimmend 100 % Deckung. Durch die Kombination von Photovoltaik und BHKW ist jedoch ebenfalls eine mittlere monatliche Deckungsrate von 100 %, eine mittlere tägliche Deckungsrate von 92 % und eine mittlere stündliche Deckungsrate von 57 % zu erreichen, während bei bisherigen, nur solarversorgten Gebäuden lediglich mittlere monatliche und tägliche Deckungsraten von etwas mehr als 75 % zu erreichen sind (vgl. Bild 54 rechts), bei stündlicher Betrachtung nur ca. 30 %. Die Ergebnisse bei reiner PV-Versorgung sind für beide Gebäude nahezu gleich.

Ursache für diesen großen Unterschied in der Deckungsrate ist der unterschiedliche zeitliche Verlauf der Summenkurven des Last- und Erzeugungsprofils bei nur solarversorgten Gebäuden (vgl. Bild 55 rechts) im Vergleich zu Gebäuden mit Einsatz eines BHKWs (vgl. Bild 55 links).

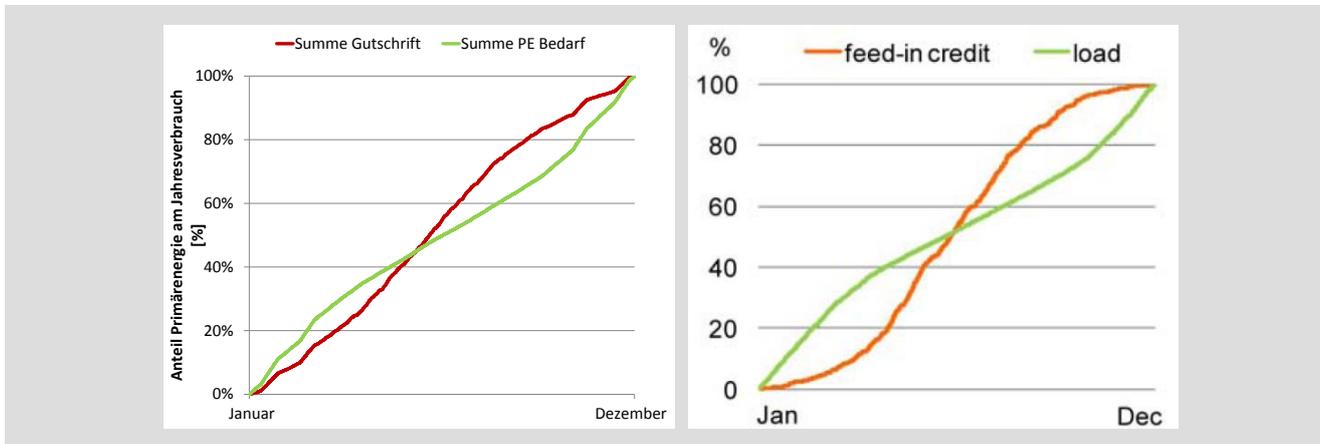


Bild 55: links: Berechneter Erzeugungs- und Lastverlauf für das Projekt Cordierstraße 4; rechts: Berechneter Erzeugungs- und Lastverlauf für das Gebäude der Universität Wuppertal zum Solar Decathlon 2010

Quelle: links: IWU; rechts: [Voss et al. 2011]

Eigenverbrauch

Der Eigenverbrauch stellt die tatsächlich selbst verbrauchte Energiemenge des selbst erzeugten Stromes in Bezug zur gesamten selbst erzeugten Energie dar und sollte messtechnisch erfasst werden. Eine Berechnung des vermutlich erzielbaren Eigenverbrauchs ist daher nur schwer möglich und kann nur auf Grundlage von sehr hoch aufgelösten Daten (z. B. Minutenwerten) erfolgen, wie in [Bost et al. 2011] vorgenommen.

Der Eigenverbrauch stellt den prozentualen Anteil des selbst genutzten Stromes dar. Für Plusenergiegebäude bedeutet dies, dass der Eigenverbrauchsanteil mit einer Vergrößerung der Photovoltaik-Anlage und/oder Erhöhung des überschüssig erzeugten Stromes sinkt. Ein Gebäude mit Energiegewinn hat daher immer einen Eigenverbrauch deutlich kleiner 100 %. Elektrische Energiespeicher können aufgrund ihrer Pufferwirkung erheblich zur Erhöhung des Eigenverbrauchs beitragen. Da der Eigenverbrauch jedoch immer auf die gesamt erzeugte Strommenge bezogen wird, eignet er sich bei Gebäuden mit Energiegewinn nur bedingt zur Bewertung des Einsatzes elektrischer Energiespeicher.

Standardabweichung und Balance zwischen Energieeinspeisung und -bezug

Durch die Standardabweichung kann die Schwankungsbreite zwischen Energiebezug aus dem Netz und Energieeinspeisung charakterisiert werden. Je kleinere Zeitschritte zur Ermittlung der Standardabweichung gewählt werden, umso besser sind die Auswirkungen des Gebäudes auf das elektrische Netz zu sehen. Der Einsatz elektrischer Energiespeicher wird bei Betrachtung der Standardabweichung gut sichtbar.

Für das in den Beispielrechnungen betrachtete Modellgebäude mit Energiegewinn ergibt sich ein Mittelwert der Einspeisung von 2,94 kW. Die Standardabweichung von diesem Mittelwert ist mit 8,04 kW relativ hoch. Hauptursache ist der Stromverbrauch des Gebäudes in den Abend- und Nachtstunden. Da zu dieser

Zeit häufig ein Verbrauch vorliegt, jedoch keine Energieerzeugung durch die Photovoltaikanlage und nur teilweise im Winter durch das BHKW vorliegt, entsteht die in Bild 56 links dargestellte hohe Häufigkeit von Energiebezug aus dem Netz von 2 - 4 kW. Dieser Energiebezug aus dem Netz könnte durch einen elektrischen Energiespeicher größtenteils vermieden werden, wie das rechte Bild zeigt. Der Mittelwert bleibt unverändert bei einer Einspeisung von 2,94 kW, die Standardabweichung sinkt auf 7,05 kW.

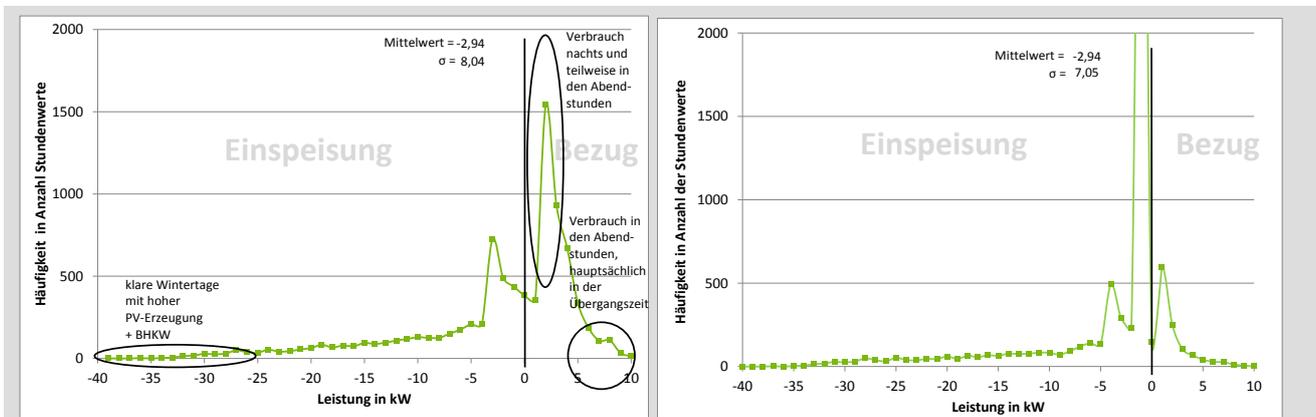


Bild 56: Häufigkeit von Einspeisung (-) und Bezug (+) im Jahresmittel auf Basis von Stundenwerten; links ohne elektrischen Energiespeicher, rechts mit Speicher 36 kWh / 18,5 kW

In Bild 57 ist die Balance zwischen Energieeinspeisung und -bezug dargestellt. Die monatliche Balance (links) zeigt analog der Deckungsrate, dass bei Einsatz von Photovoltaik und BHKW in keinem Monat mehr Energie aus dem Netz bezogen als eingespeist wird. Die tägliche Balance (rechts) zeigt, dass durch den Einsatz des BHKWs an manchen Tagen kein Bezug von Energie aus dem Netz notwendig ist (schwarze Werte auf der y-Achse). Dies sind die Tage an denen das BHKW durchläuft. Die gelben Werte zeigen die Balance für den Fall, dass in dem gleichen Gebäude mit gleicher Photovoltaik-Anlage keine zusätzliche elektrische Energie durch das BHKW erzeugt wird.

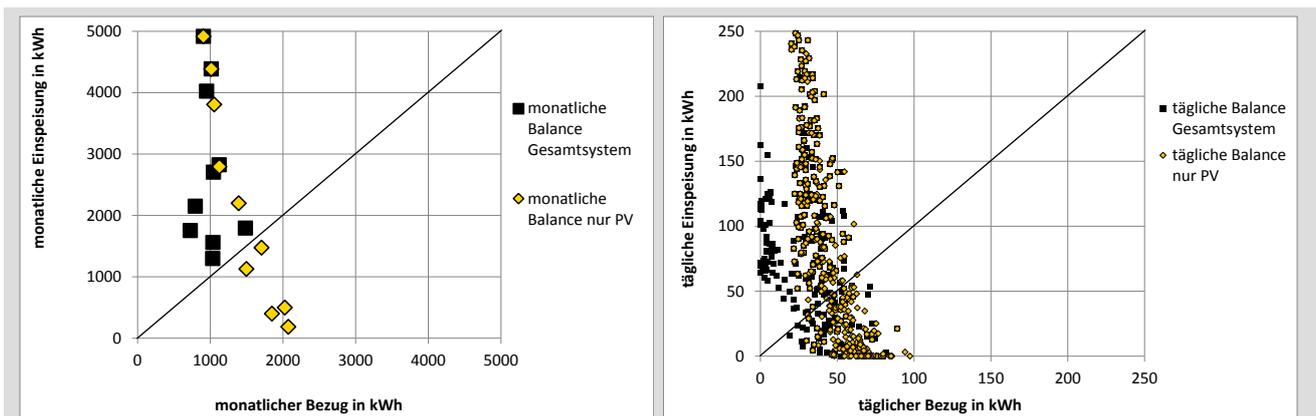


Bild 57: links: monatliche Einspeisung über dem monatlichen Bezug
rechts: tägliche Einspeisung über dem täglichen Bezug

4.4.2 Typen elektrischer Energiespeicher

Es sind zahlreiche unterschiedliche Konzepte elektrischer Energiespeicher am Markt verfügbar, und es werden weitere Typen entwickelt. Man charakterisiert elektrische Energiespeicher vor allem bezüglich ihrer Speicherkapazität, ihrer Leistung, der Zyklenzahl, dem Wirkungsgrad und den Kosten, je nach Anwendungsgebiet auch nach Energiedichte, Selbstentladung oder weiteren Kriterien. Wie oben beschrieben, sollte die Auslegung eines Energiespeichers für ein Wohngebäude vorrangig die Abdeckung des Verbrauchs in den Abend- und Nachtstunden im Fokus haben, um den Eigenverbrauch zu optimieren. Dafür kommen aufgrund von Speicherkapazität, Selbstentladung und Kosten zzt. hauptsächlich elektrochemische Batteriespeicher auf Basis von Blei-, Lithium-Ionen- oder LiFePO4-Technologie in Frage.

Bei der Regelungstechnik unterscheidet man zwischen netzparallelen Systemen, bei denen der Speicher parallel zu Verbrauchern und Erzeugern im Gebäude geschaltet wird und Systemen, bei denen die gesamte Leistung aller Verbraucher aus dem Speicher entnommen wird, so lange dieser noch ausreichend Kapazität aufweist. Ist die Speicherkapazität in letzterem erschöpft, wird auf Netzbezug vom Versorger umgeschaltet. Die Konsequenz dieses Netzalternativbetriebs sind höhere erforderliche Leistungen des Speichers bzw. ein vollständiger Bezug vom Versorger, wenn die maximale Speicherleistung überschritten ist. Dafür ist die Regelung der Anlage etwas einfacher.

Speicher	Eigenschaften
Chemische Speicher <ul style="list-style-type: none"> • Blei-Säure • Lithium-Ionen • Redox-Flow 	+ etabliert + geringe Anschaffungskosten -- Lebensdauer
Pumpspeicher	++ Große Kapazität -- Ausbaumöglichkeiten - Akzeptanz
Kondensatoren	++ Hohe Leistung - Hohe Kosten - Geringe Kapazität
Wasserstoff	+ Große Kapazität - Hoher Invest -- geringe Effizienz
Kinetische Energiespeicher	+ Hohe Leistung ++ Hohe Lebensdauer - Komplexes System

Bild 58: Übersicht der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Elektrischer Energiespeicher [Qurck 2013]

4.4.3 Auswirkungen des Einsatzes eines elektrischen Energiespeichers

Zur Untersuchung der Auswirkungen eines elektrischen Energiespeichers auf den Deckungsgrad des Gebäudes wurden reale Messungen (Stundendaten) des Lastprofils des Gebäudes Rotlintstraße 122/124 aus dem Modernisierungsvorhaben Frankfurt-Rotlintstraße [Großklos 2013] auf die Größe des Gebäudes in der Cordierstraße 4 skaliert (von 18 auf 17 Wohneinheiten) und zusätzlich anteilig die Last der zentralen Anlagentechnik addiert. Das sich ergebende Lastprofil über ein Jahr ist in Bild 59 dargestellt. Mit ihm und den

simulierten Erträgen der PV-Anlagen und des BHKW wurden die Eigenerzeugung im Gebäude bestimmt und für unterschiedliche Speicherauslegungen die Kenndaten ermittelt.

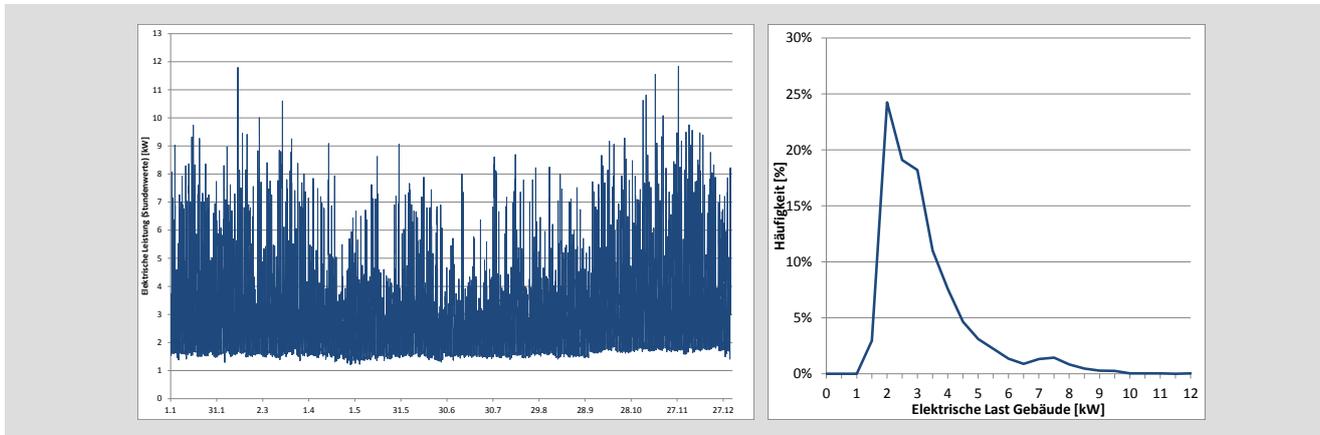


Bild 59: links: Gemessener Lastgang des Mehrfamilienhauses Rotlintstraße 122/124 [Großklos 2013], skaliert auf die Wohneinheiten des Gebäude in der Cordierstraße 4; rechts: prozentuale Häufigkeitsverteilung der Last

Die minimale Last lag bei 1,2 kW, die maximale bei 11,8 kW, der Mittelwert im Gebäude liegt bei 3,0 kW, die Standardabweichung bei 1,47 kW (jeweils als Stundenmittel).

Bei den folgenden Betrachtungen zur Optimierung der Speicherauslegung wurden die Einflussfaktoren Deckungsrate, Reduktion des Netzbezugs und Minimierung der Ladezyklen berücksichtigt. Alle Betrachtungen basieren auf Stundendaten, so dass Lastschwankungen im Sekunden- und Minutenbereich nicht in die Betrachtung eingehen konnten. Eine Selbstentladung des Elektrospeichers wurde aufgrund der kurzen Speicherintervalle nicht berücksichtigt.

Deckungsrate

Die Deckungsrate – das Verhältnis der Eigenstromerzeugung zum Stromverbrauch – hängt nur in geringem Maße von der maximalen Leistung des Speichers ab (siehe Bild 60). Sie kann ausgehend von der Situation ohne Speicher mit 57 % (im Diagramm nicht dargestellt) bei einem angenommenen Gesamtwirkungsgrad des Speichers von 95 % bis auf 90 % bei einer nutzbaren Speicherkapazität von 50 kWh gesteigert werden. Bild 61 links zeigt exemplarisch für einen Speicher mit 10 kWh und 35 kWh Kapazität den geringen Einfluss der maximalen Leistung des Energiespeichers auf die Deckungsrate. Die rechte Abbildung zeigt für unterschiedliche Leistungen den Anstieg der Deckungsrate mit ansteigender Speicherkapazität. Bei hohen nutzbaren Kapazitäten schwächt sich die Kurve deutlich ab, so dass bei 50 kWh nutzbarer Speicherkapazität 90 % Deckungsrate erreicht werden.

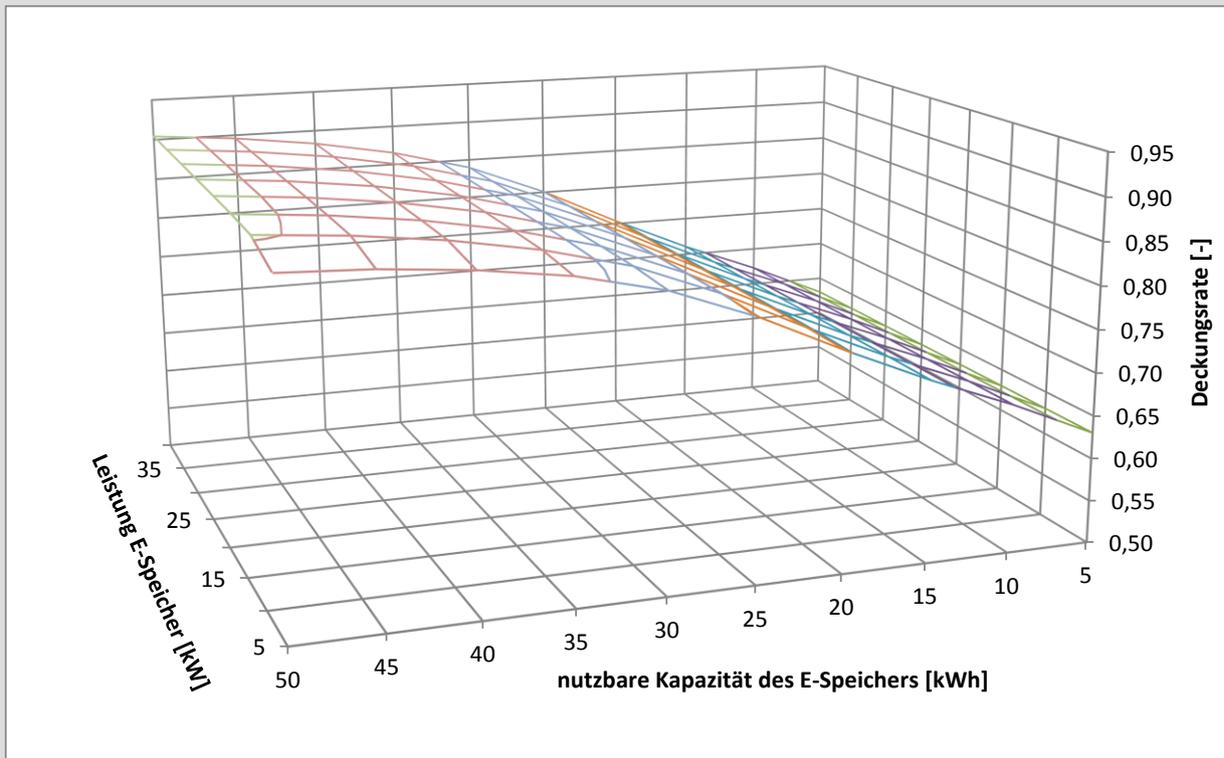


Bild 60: Abhängigkeit der Deckungsrate von der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers und dessen maximaler elektrischer Leistung

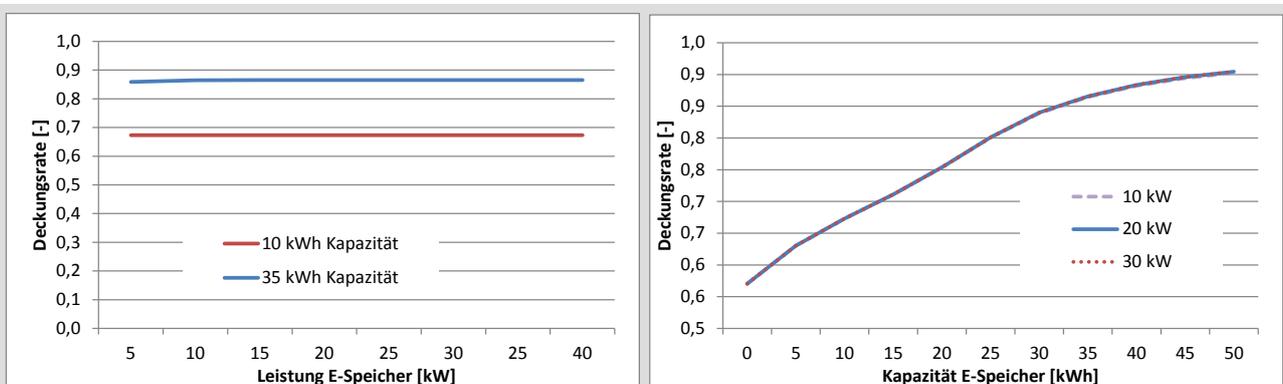


Bild 61: Deckungsrate für unterschiedliche maximale Leistungen des Elektrospeichers (links) und unterschiedliche nutzbare Kapazitäten (rechts)

Reduktion Netzbezug

Ohne Elektrospeicher müssen trotz der eigenen Erzeugungsanlagen immer noch 11.815 kWh bzw. 45 % des Verbrauchs aus dem elektrischen Netz bezogen werden. Mit Speicher führen niedrige maximale Leistungen in geringem Umfang zu höherem verbleibenden Netzbezug, ab ca. 15 kW ist jedoch kein Einfluss der Leistung mehr erkennbar (Bild 62). Durch die ansteigende Kapazität kann der Netzbezug bei 50 kWh nutzbarer Kapazität bis auf ca. 10 % reduziert werden, die Kurvenschar verläuft jedoch bis ca. 25 kWh nutzbarer Kapazität vergleichsweise flach, so dass dann der Netzbezug bei 18 % liegt.

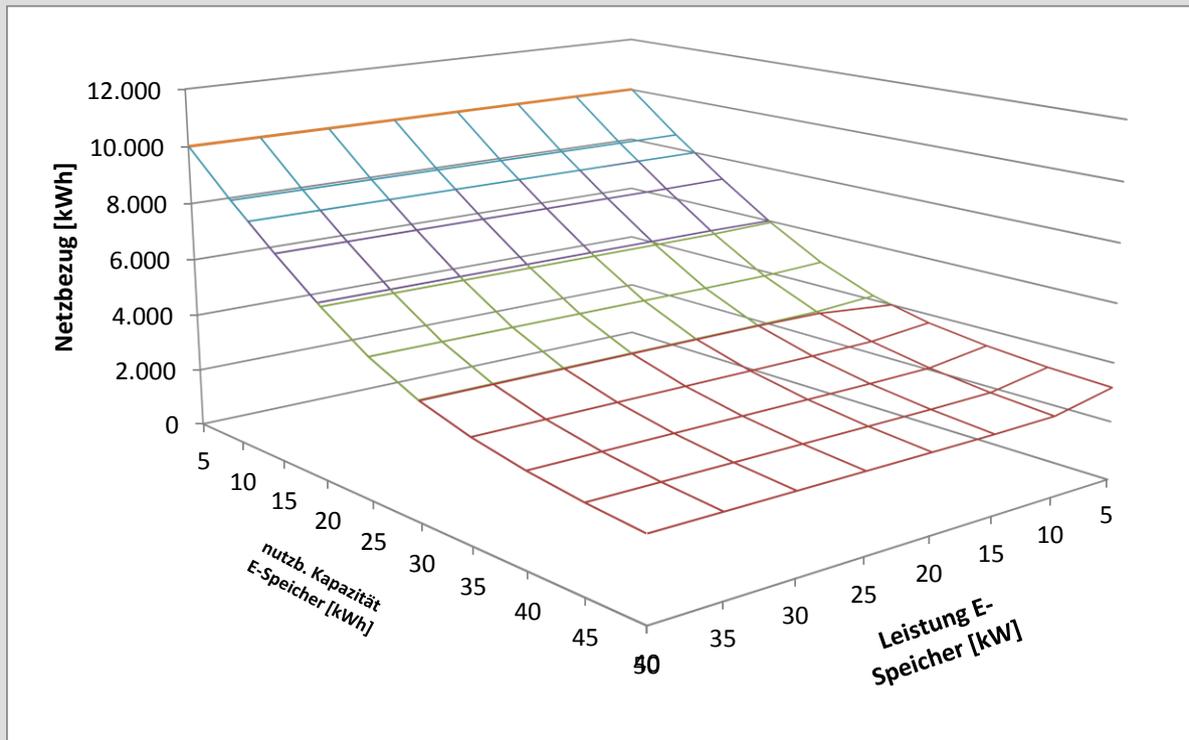


Bild 62: Aus dem Netz bezogene elektrische Energie in Abhängigkeit von der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers und dessen maximaler elektrischer Leistung

In Bild 63 sind der Einfluss der Leistung (links) und der Kapazität (rechts) für unterschiedliche Speicher dargestellt.

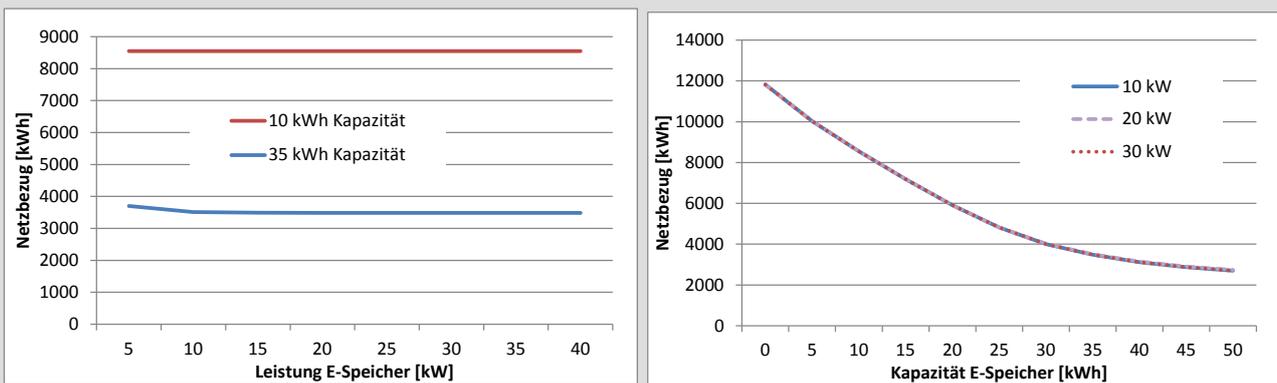


Bild 63: Abhängigkeit des Netzbezugs von der maximalen elektrischen Leistung (links) und der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers (rechts)

Minimierung der Ladezyklen

Je nach Typ des Elektrospeichers erlauben die elektrochemischen Prozesse nur eine begrenzte Anzahl von Ladezyklen, bis die Nennkapazität um einen definierten Betrag abgenommen hat. Bei den hier betrachteten LiFePO₄-Akkumulatoren werden 4.000 Vollzyklen bis zur Reduktion auf 80 % der Nennkapazität und 6.000 Stunden bis 50 % der Nennkapazität angegeben. Danach sind die Speicher noch nicht defekt, die Effektivität der Anlage reduziert sich jedoch deutlich.

Bild 64 zeigt die Abhängigkeit der Anzahl der Vollladungen pro Jahr von der maximalen Leistung und der nutzbaren Kapazität. Auch hier ist der Einfluss der maximalen Leistung erkennbar: bei geringen Leistungen sinkt die Anzahl der Vollladezyklen mit zunehmender Kapazität stärker als bei hohen Leistungen. Die Zyklenanzahl kann von ca. 360 bei 5 kWh auf ca. 190 Zyklen bei 50 kWh reduziert werden. Lade- und Entladezyklen sind im Bilanzzeitraum identisch, so dass hier die Ladezyklen dargestellt sind.

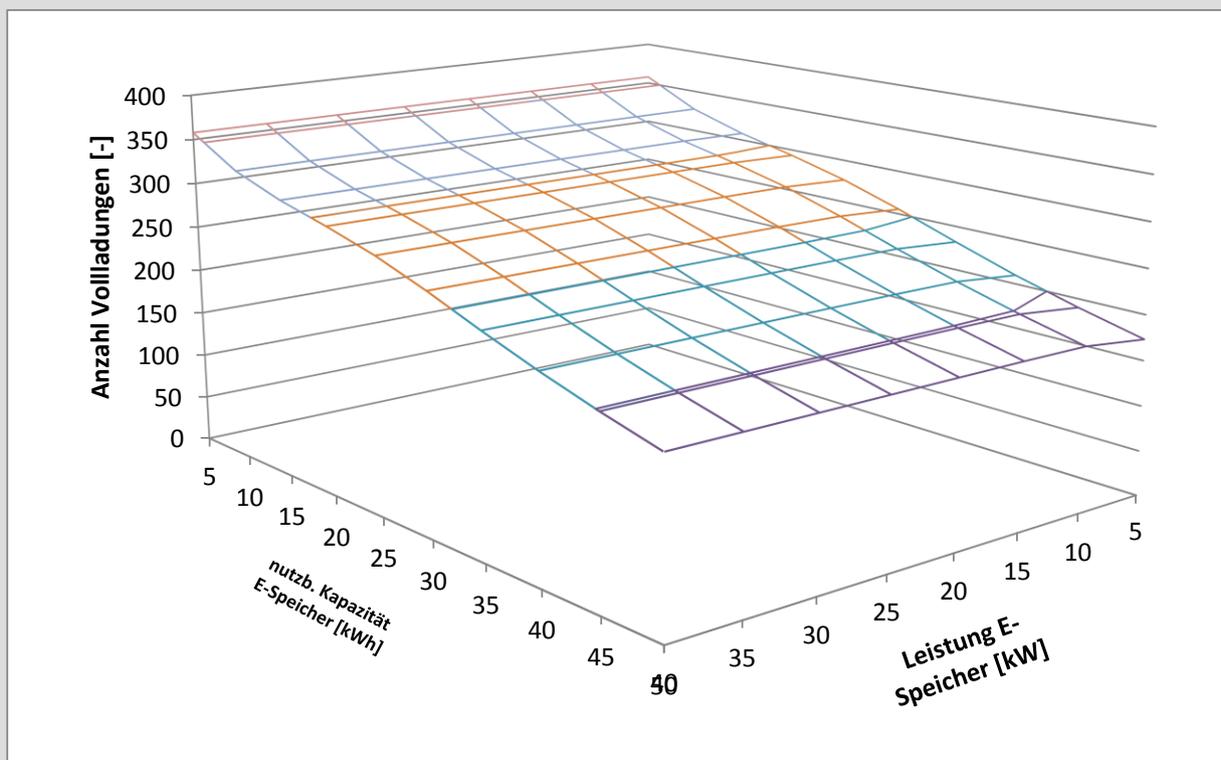


Bild 64: Anzahl der Vollladungen in Abhängigkeit von der maximalen elektrischen Leistung und der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers

In Bild 65 sind die benötigten Lade- und Entladezyklen eines Jahres für unterschiedliche Leistungen (links) und verschiedene Kapazitäten (rechts) dargestellt. Man erkennt, dass der Einfluss der maximalen Leistung im dargestellten Bereich geringfügig unterschiedlich ausfällt (links). Bei zunehmender Kapazität (rechtes Bild) verringern sich die Lade-/Entladezyklen nahezu linear.

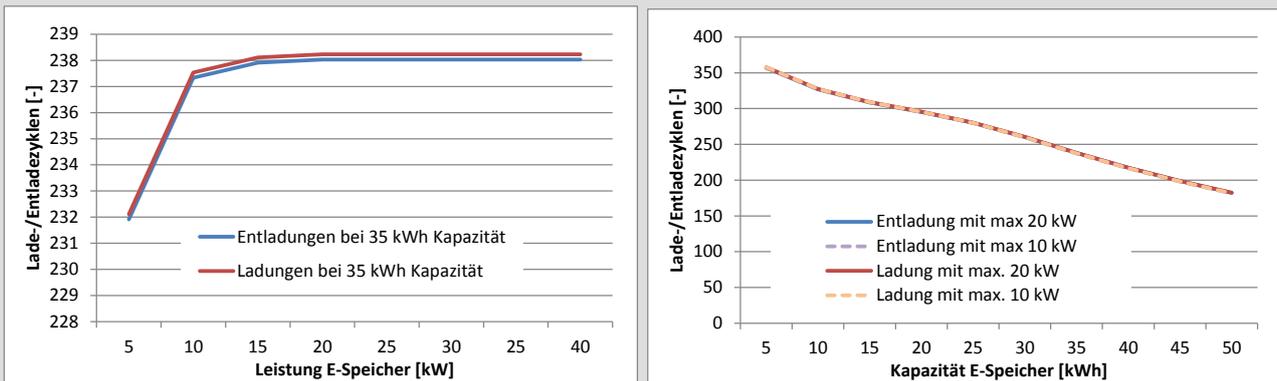


Bild 65: Anzahl der Lade-/Entladezyklen in Abhängigkeit von der maximalen elektrischen Leistung (links) und der nutzbaren Kapazität des Elektrospeichers (rechts)

Vergleich von unterschiedlichen Auslegungen von Elektrospeichern

Für das Gebäude in der Cordierstraße 4 wurden verschiedene Anbieter elektrischer Energiespeicher angefragt, die eingegangenen Angebote beinhalteten ausschließlich Lithium-Ion oder Lithium-Eisen-Phosphat-Speicher (LiFePO4). Da diese sich in ihren wesentlichen elektrischen Eigenschaften nur wenig unterscheiden, werden für die weiteren Auswertungen im Folgenden unterschiedliche Konfigurationen eines LiFePO4-Speichers betrachtet.

Tabelle 13: Kenndaten unterschiedlicher Speicherauslegungen

Leistung	nutzbare Kapazität	Netzbezug	Netzeinspeisung	Deckungsrate	Ladungen	theoretische Gebrauchsdauer	Nettoangebotspreis Speicher	Kosten Reduktion Netzbezug
kW	kWh	kWh	kWh	-	-	a	€	Cent/kWh
18,5	44,0	2.915	28.633	0,89	202	19,8		
18,5	36,0	3.402	29.120	0,87	234	17,1	35.900	25,0
18,5	32,0	3.772	29.489	0,85	252	15,9	32.700	26,1
18,5	24,0	5.011	30.728	0,79	284	14,1	26.300	30,9
6,0	12,0	7.992	33.710	0,69	319	12,5	13.950	54,9
0,0	0,0	11.815	37.539	0,57				

In Tabelle 13 sind verschiedene Kenndaten eines Elektrospeichers mit nutzbaren Kapazitäten zwischen 12 kWh und 44 kWh dargestellt, außerdem die Situation ohne Speicher. Wichtig für die Haltbarkeit des Elektrospeichers ist die Anzahl der Vollladezyklen. Hersteller geben einen Richtwert von 4000 Vollladungen insgesamt an [Solaranlagen-Portal 2013], daraus ergibt sich dann die theoretische Gebrauchsdauer des Speichers. Man erkennt, die Gebrauchsdauer des Speichers auf Basis von Ladezyklen steigt mit zunehmender Kapazität von 12,5 Jahren bis auf 19,8 Jahre. Die Nutzungsdauer wird von mehreren Herstellern mit 20 Jahren angegeben, woraus sich 250 Vollladezyklen pro Jahr als Richtwert ergeben. Dieser Wert wird ab ca. 32 kWh Kapazität erreicht. Nicht berücksichtigt sind hier die Mikrozyklen (kurzfristige Ladungen und Entladungen innerhalb des hier betrachteten Stundenintervalls), die ebenfalls auf die Vollladezyklen angerechnet werden müssen, die sich aber erst aus dem realen Betrieb ergeben. Hierfür liegen bisher keinerlei Erfahrungswerte für Mehrfamilienhäuser mit der untersuchten Anlagenkonfiguration vor.

Bei steigender nutzbarer Kapazität steigt auch die stündliche Deckungsrate von 69 % bis auf 89 %. Die Kosten für die Reduktion des Netzbezugs sinken mit zunehmender Speichergröße von 55 Ct/kWh³ (ohne Förderung). Allerdings nicht berücksichtigt sind hier die Kosten der Eigenstromerzeugung. Bild 66 zeigt im Vergleich Speicherladung und Strombezug/Einspeisung bei 36 kWh (links) und 12 kWh (rechts) nutzbarer Kapazität. Mit dem größeren Speicher kann der Netzbezug im Sommer nahezu vollständig vermieden werden, der kleinere Speicher schafft nur im Winter, wenn das BHKW in Betrieb ist, dass das Versorgungsnetz nicht permanent als Puffer in Anspruch genommen werden muss.

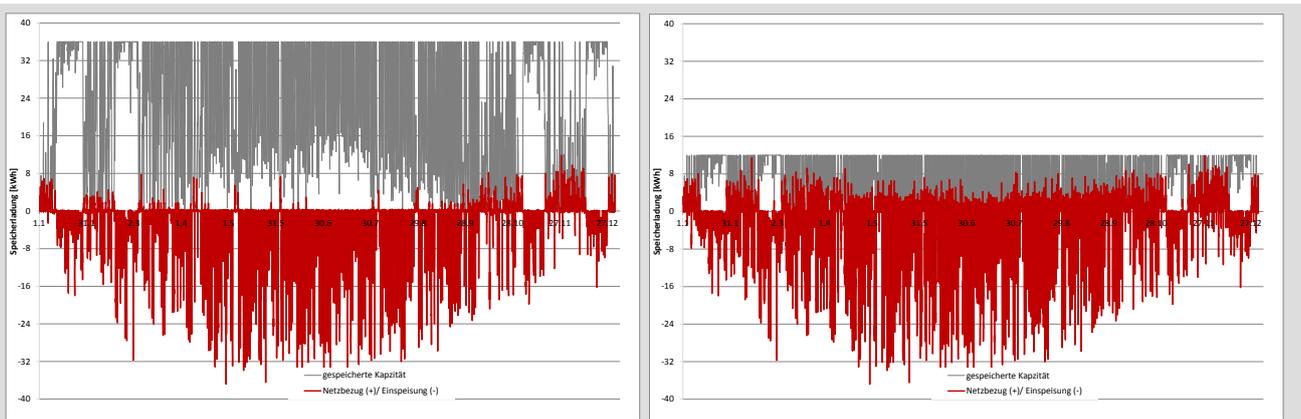


Bild 66: links: gespeicherte elektrische Energie und Netzbezug(+)/-einspeisung(-) bei 36 kWh/18,5 kW Elektrospeicher; rechts: gespeicherte elektrische Energie und Netzbezug(+)/-einspeisung(-) bei 12 kWh/6 kW

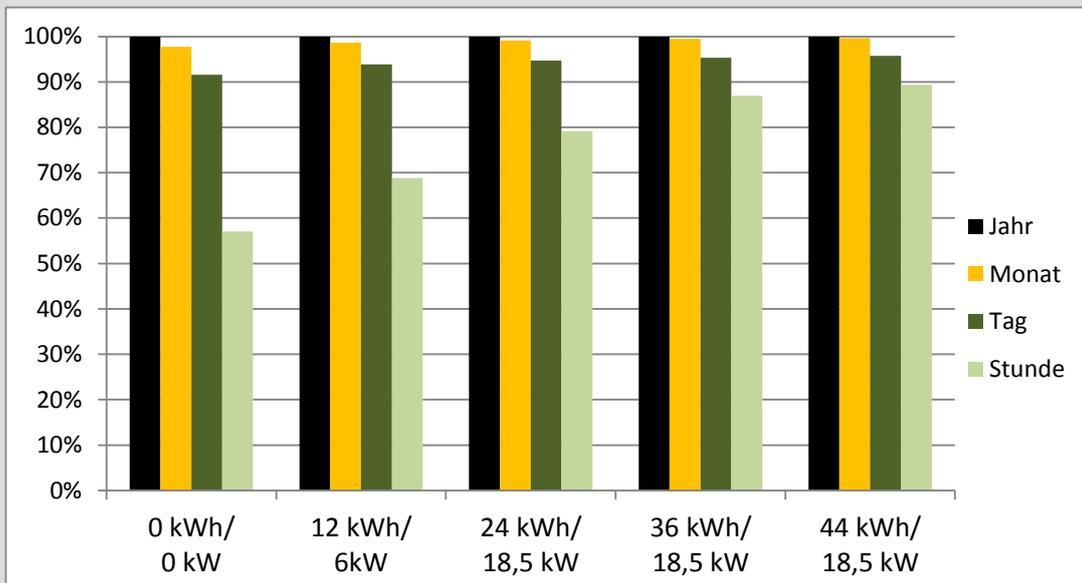


Bild 67: Deckungsraten für unterschiedliche Auslegungen des Elektrospeichers und verschiedene Bilanzierungszeiträume

³ Dargestellt sind Nettopreise für den Speicher ohne Montage und Systemintegration. Für den größten Speicher mit 44 kWh nutzbarer Kapazität lag kein Preis vor.

In Bild 67 sind die Deckungsraten der unterschiedlichen Elektrospeicher sowie die Vergleichsvariante ohne Speicher (0 kWh/0 kW) dargestellt. Man erkennt, dass der Einfluss des Speichers bei jährlicher, monatlicher oder täglicher Betrachtung gering ist. Nähert man sich mit der stündlichen Betrachtung den realen Lastprofilen näher an, so ist mit steigender Speicherkapazität auch eine deutliche Verbesserung der Deckungsrate bis auf 89 % zu erkennen.

Der Elektrospeicher in der Cordierstraße 4 fällt aufgrund der Größe der PV-Anlage von mehr als 30 kWp nicht unter die Förderbedingungen der KfW für Elektrospeicher [KfW 2013]. Dennoch soll betrachtet werden, welche Auswirkungen der Speicher auf die maximale PV-Einspeisung von 60 % der installierten Leistung hat, was in den Richtlinien als Fördervoraussetzung definiert ist.

Die maximale PV-Leistung auf Basis der Simulationen liegt bei 39,05 kW (24.05. um 12 Uhr). Wenn die Ladeelektronik des Batteriespeichers keine Vorkehrung zur Begrenzung der Mittagsspitze besitzt, wird zu diesem Zeitpunkt eine maximale Leistung von 36,82 kW ins Netz eingespeist, da der Elektrospeicher bereits um 10 Uhr an diesem Tag vollständig geladen ist und keinen Effekt zur Begrenzung der Netzlast besitzt. Wie groß der Einfluss der nutzbaren Speicherkapazität auf maximale Einspeiseleistung ist, zeigt Bild 68. Dort sind links drei Tage im Mai mit der Jahresspitze der PV-Erzeugung bei einem Elektrospeicher mit 36 kWh nutzbarer Kapazität dargestellt, rechts ein Elektrospeicher mit 24 kWh Kapazität. Durch die Vergrößerung des Speichers von 24 auf 36 kWh (+50 %) ergeben sich keine Auswirkungen auf die maximale Einspeisung, da in beiden Varianten der Speicher vor der Tagesspitze vollständig geladen ist. Allerdings reicht der kleinere Speicher nicht aus, um auch den Nachtverbrauch an diesen Tagen vollständig zu decken, so dass zusätzlich Energie aus dem Netz entnommen werden muss.

Bei einer installierten PV-Leistung von insgesamt 49,68 kW wird die maximale Einspeisung durch den unregulierten Elektrospeicher auf 74 % der installierten Leistung begrenzt. Wollte man die Anforderungen für Netzdienlichkeit des KfW-Förderprogramms erfüllen, wäre somit zwingend eine angepasste Regelung erforderlich, die dafür sorgt, dass der Speicher zur Mittagsspitze noch eine Restkapazität zur Verfügung hat. Ein Speicher alleine – in weiten Bereichen unabhängig von der Dimensionierung – reicht dafür nicht aus. Eine solche angepasste, netzdienliche Regelung ist zurzeit noch nicht verfügbar, Speicherhersteller arbeiten jedoch an diesen Regelungen und es ist anzunehmen, dass eine netzdienliche Regelung in naher Zukunft verfügbar sein wird und auch bei dem Speicher in der Cordierstraße 4 nachgerüstet werden könnte.

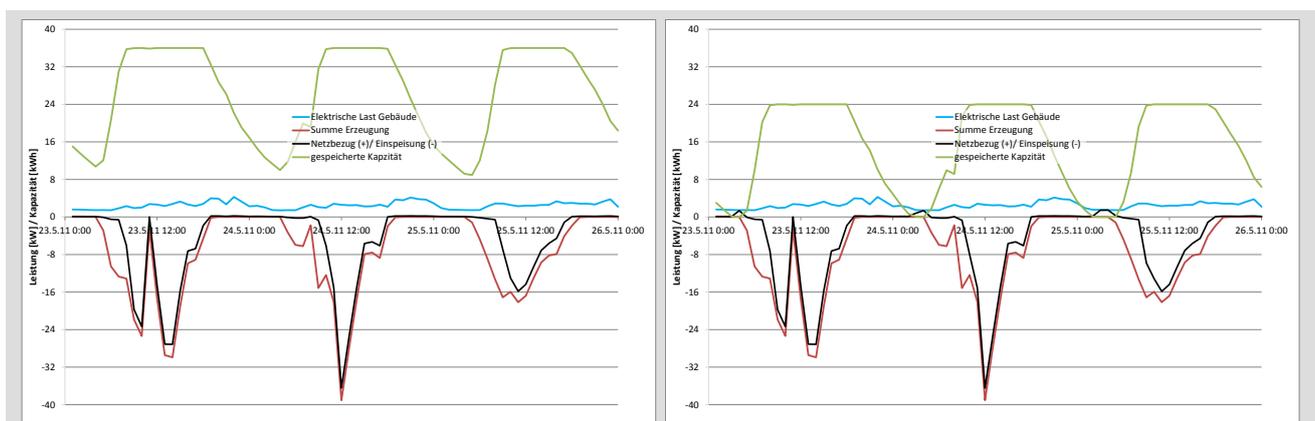


Bild 68: Verlauf von Lastgang(+), Erzeugung(-), Netzeinspeisung(-) und gespeicherter Kapazität; links: bei Elektrospeicher 36 kWh/18,5 kW, rechts: bei 24 kWh/18,5 kW

Für die Cordierstraße 4 lagen zum Zeitpunkt der Berichterstellung drei Angebote von unterschiedlichen Anbietern vor, die alle LiFePO₄-Akkumulatoren einsetzen. Die nutzbare Kapazität liegt zwischen 29 kWh und 36 kWh, die Lade-/Entladeleistungen zwischen 15 kW und 21 kW. Vergleichsrechnungen mit den individuellen Anlagen zeigten keinen signifikanten Einfluss der Ladeleistung auf die Deckungsrate. Mit den unterschiedlichen nutzbaren Speicherkapazitäten ergeben sich Deckungsraten zwischen 83 % und 87 %. Welche Anlage in der Cordierstraße 4 installiert wird, stand zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht fest.

Die Lade-/Entladeregulierung des Elektrospeichers erfolgt generell in einem vom Hersteller erstellten Programm zur optimierten Berücksichtigung der Charakteristik der LiFePO₄-Speicher. Ein generelles Schema der Regelung von Batteriespeichern zur Eigenverbrauchsoptimierung ist in Bild 69 dargestellt.

Anmerkung

Die oben dargestellten Abbildungen gelten nur für die konkrete Situation des Projekts Cordierstraße 4, besonders wegen der Kombination zweier Anlagen, die teilweise alternativ elektrische Energie erzeugen und somit die Erzeugung im Jahresgang gut verteilen. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Betrachtungen aufgrund fehlender Eingangsdaten nur auf Basis von Stundenwerten berechnet werden konnten. Diese könnten die bei Gebäuden vorhandenen dynamisch schwankenden Lasten und vor allem die kurzen Lastspitzen nicht umfassend abbilden. Dies ist besonders bei den prognostizierten Ladezyklen/Lebensdauern zu berücksichtigen. Die Betrachtungen sind jedoch geeignet, die grundlegenden Unterschiede verschiedener Anlagenauslegungen zu vergleichen.

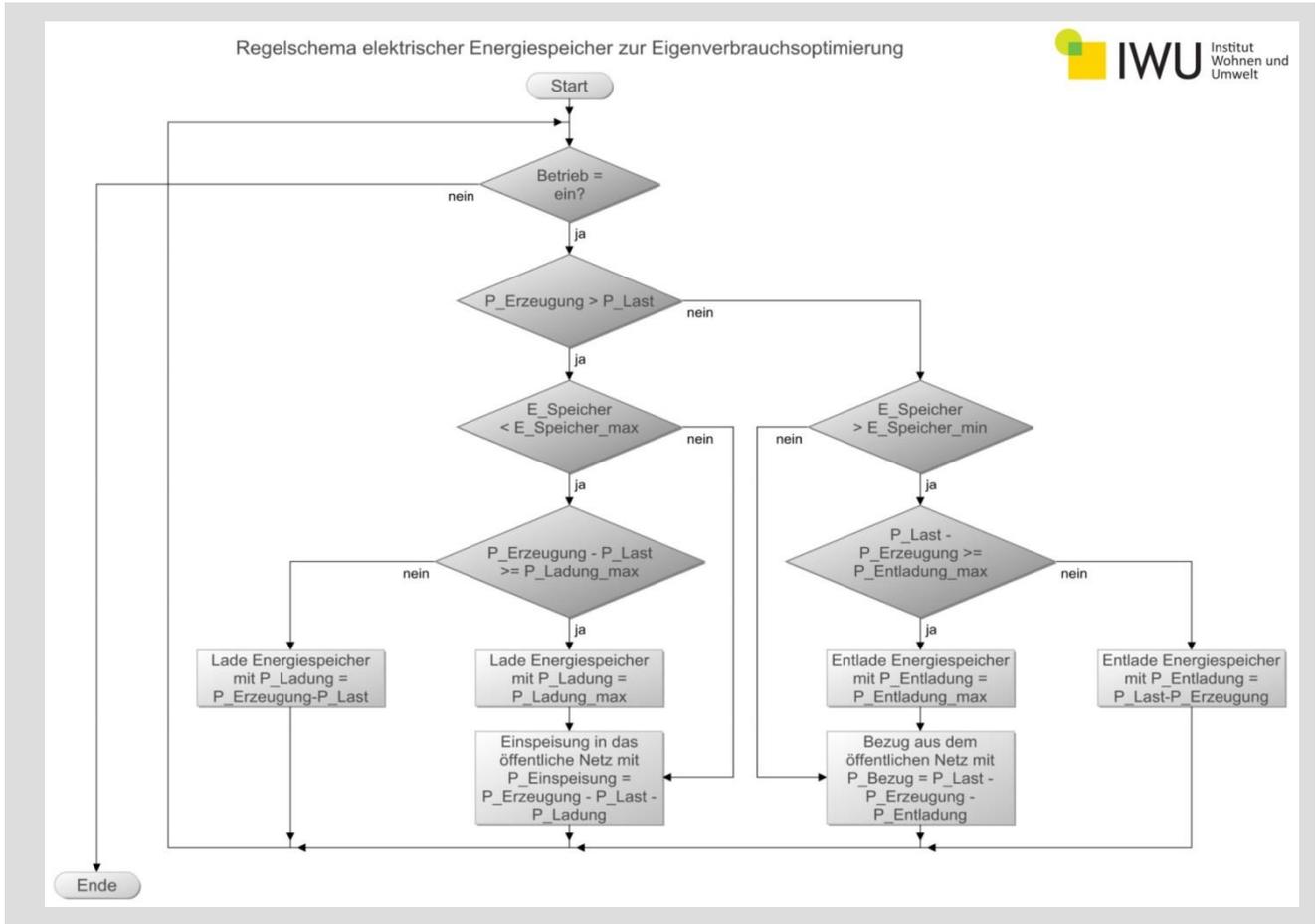


Bild 69: Regelschema elektrischer Energiespeicher zur Eigenverbrauchsoptimierung

5 Energiebilanz

Die Ausführungsplanung und die Energiebilanz haben sich in der Bauphase fortwährend verändert. Im Vergleich zu den Untersuchungen in Kapitel 4 hat sich die solare Energieerzeugung durch Photovoltaik und solarthermische Anlage durch eine effizientere Ausnutzung der vorhandenen Flächen und effizientere Komponenten erhöht. Der Energiebedarf des Gebäudes ist jedoch gleich geblieben. In diesem Kapitel wird nun die Energiebilanz anhand des Planungs-/Ausführungsstandes Oktober 2013 dargestellt. Im Anschluss folgt der Vergleich dieser Kennwerte mit den Bilanzkennwerten, die sich bei der Bilanzierung des Effizienzhauses Plus nach der Definition des BMVBS in Anlehnung an EnEV/DIN V 18599 ergeben.

5.1 Energiebilanz PHPP/ GEMIS

Tabelle 14 zeigt die Energiekennwerte des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4. Die Kennwerte spiegeln die Projektziele wieder: Die hohe Energieeffizienz des Gebäudes und seiner Ausstattung zeigt sich durch die niedrigen Bedarfswerte für Wärme (Heizung 15,21 kWh/(m²a), Warmwasser 16,61 kWh/(m²a)), Verluste (Heizung 0,9 kWh/(m²a), Warmwasser 4,56 kWh/(m²a)) sowie elektrische Energie (Haushaltsstrom 14,43 kWh/(m²a), Hilfsstrom 6,93 kWh/(m²a)).

**Tabelle 14: Energiekennwerte des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4
Stand Oktober 2013**

	kWh/(m ² a)	kWh/a
Heizwärmebedarf	15,21	18.544
Verluste Heizwärme	0,90	1.092
Warmwasserbedarf	16,61	20.254
Verluste Warmwasser	4,56	5.557
Haushaltsstrombedarf	14,43	17.595
Hilfsstrombedarf	6,93	8.452
solarthermische Energie an das System	14,81	18.065
Wärmeerzeugung Biomethan-BHKW	22,45	27.382
Stromerzeugung Biomethan-BHKW	7,89	9.401
Stromerzeugung Photovoltaik	33,87	41.300
Strom Überschuss	-20,40	-24.654
Endenergie	9,95	12.129
Primärenergie	-22,43	-26.931
Genutzte Biomasse	30,34	37.003
CO ₂ -Äquivalent	1,75 kg/(m ² a)	2.096

Die für solare Energieerzeugung nutzbaren Flächen werden mit effizienten Komponenten optimal genutzt, so dass eine hohe solarthermische Wärmeerzeugung und eine hohe Energieerzeugung durch Photovoltaik erreicht werden kann. Das Biomethan-BHKW erzeugt die restliche benötigte Wärme und gleichzeitig elektrische Energie. Insgesamt kann auf diese Weise ein Überschuss an elektrischer Energie in Höhe von 20,4 kWh/(m²a) erreicht werden (vgl. Tabelle 14 und Bild 70).

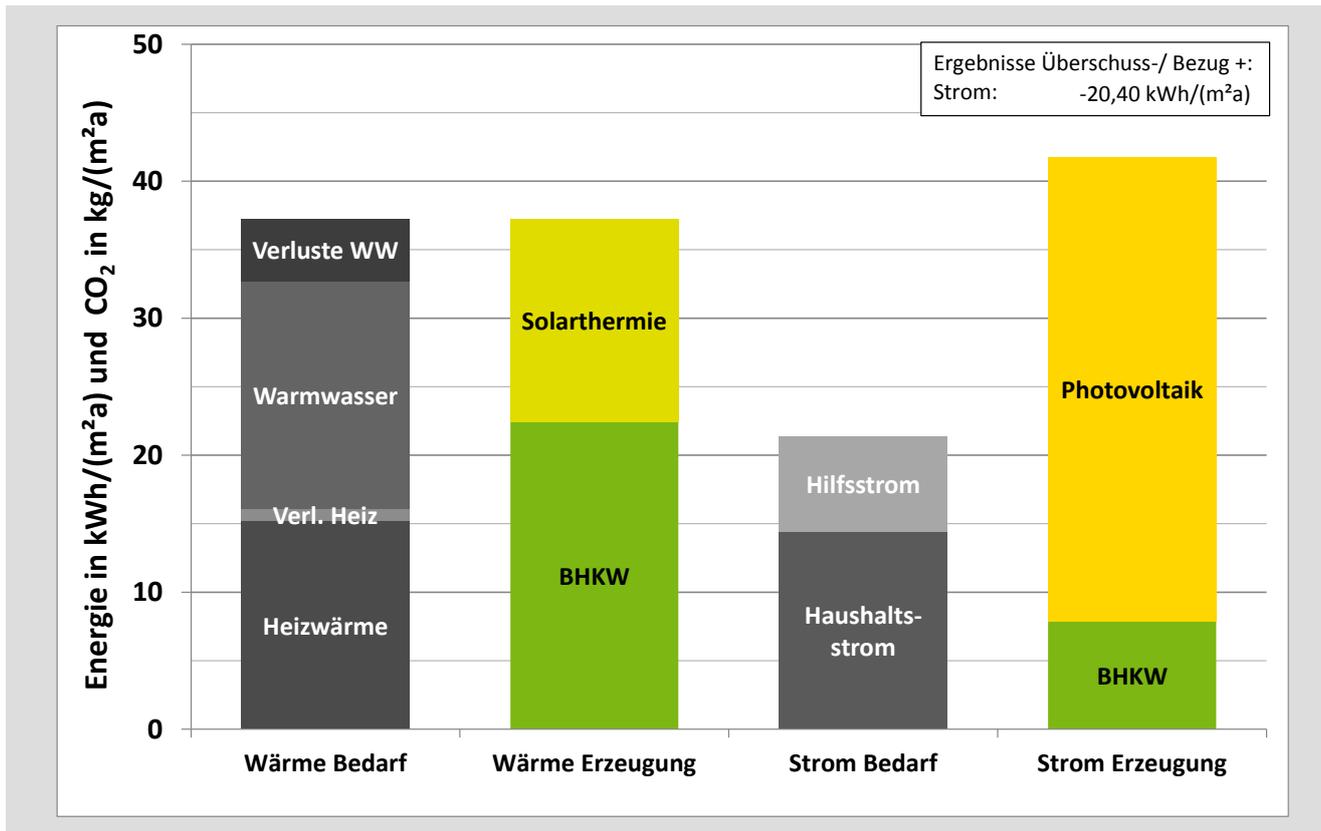


Bild 70: Energiebedarf und -erzeugung des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4 Stand Oktober 2013

Auf Basis dieses sehr effizienten Gebäudes und der hohen Energieerzeugung ergeben sich sehr gute Energiekennwerte (vgl. Bild 71). So wird in der Primärenergiebilanz ein Überschuss von 22,43 kWh/(m²a) erzielt. Auch das Ergebnis der endenergetischen Bilanz konnte auf einen Endenergiebedarf von 9,95 kWh/(m²a) weiter verbessert werden (bedingt durch den Einsatz eines externen Energieträgers kann dieser nicht negativ werden). Die Treibhausgas-Bilanz kann mit nur noch 1,75 kg CO₂-Äquivalent/(m²a) als nahezu ausgeglichen bezeichnet werden, ein besseres Ergebnis könnte hier nur durch eine noch stärkere Energieeinsparung oder mit einem anderen Energieträger für das BHKW (z. B. Rapsöl) erzielt werden.

Das Biomasse-Potenzial von 35 kWh/(m²a) wurde mit einer Nutzung von 30,34 kWh/(m²a) eingehalten, wobei hiervon nur 22,45 kWh/(m²a) auf die Wärmeerzeugung entfallen und 7,89 kWh/(m²a) der elektrischen Energieerzeugung durch das BHKW zugerechnet werden können. Auch unter diesem Aspekt kann das Gebäude als zukunftsweisend betrachtet werden.

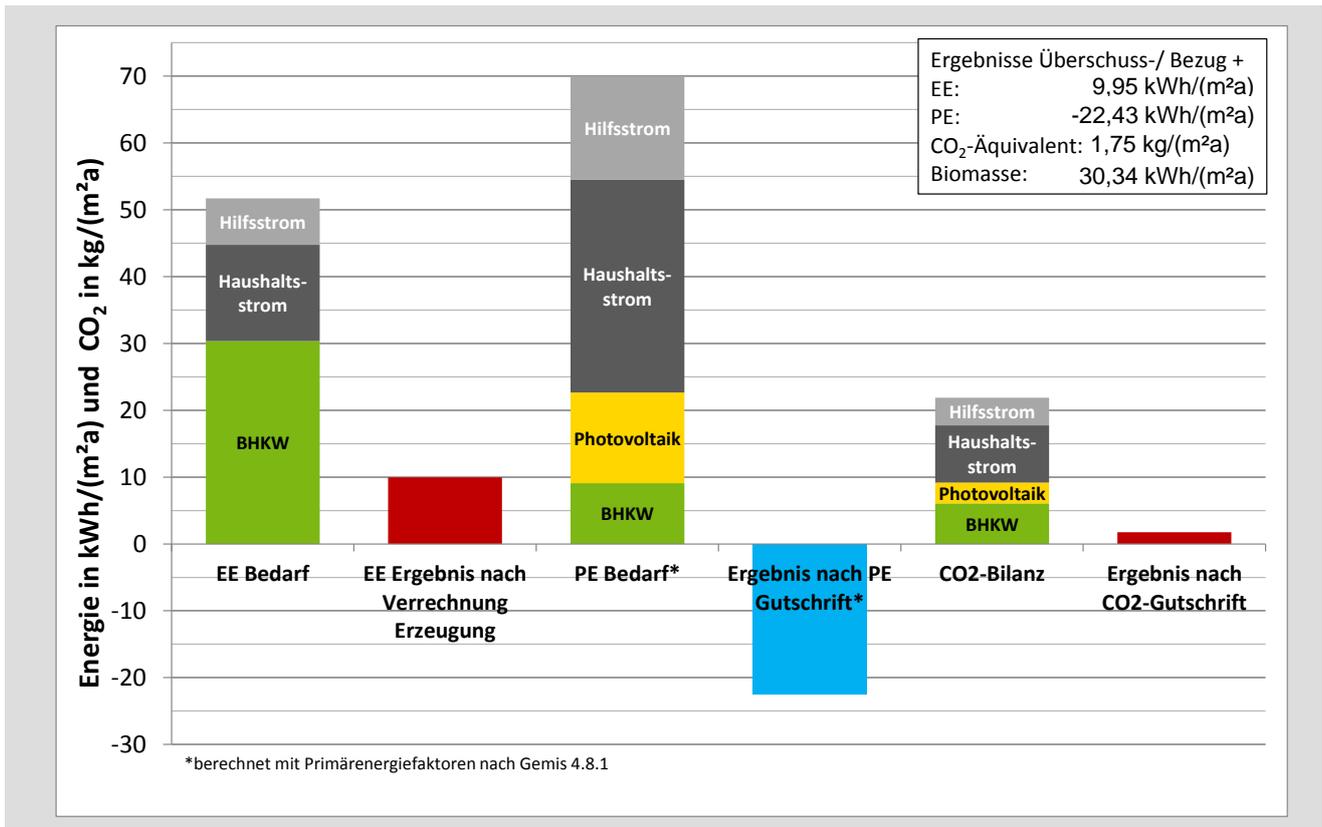


Bild 71: Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie CO₂-Emissionen des Passivhauses mit Energiegewinn Cordierstraße 4, Stand Oktober 2013

5.2 Bilanzergebnisse im Vergleich PHPP/GEMIS zu EnEV/DIN V 18599

Die zuvor dargestellte Energiebilanz, die anhand des PHPP mit Hilfe von Energiekennwerten mit GEMIS erstellt wurde, weicht in mehreren Punkten von der Bilanzierung nach EnEV in Verbindung mit der DIN V 18599 gemäß der Rahmenbedingungen des Effizienzhauses Plus ab (vgl. Kapitel 2.1.1 und 2.1.2). Das Passivhaus mit Energiegewinn Cordierstraße 4 erreicht jedoch die Zielwert-Anforderung beider Verfahren mit sehr guten Ergebnissen. Tabelle 15 stellt die Ergebnisse der beiden Verfahren und wichtige Randbedingungen dar.

Generell zeigt der Vergleich der Energiekennwerte mit dem Referenzgebäude nach EnEV, unabhängig vom Bilanzierungsverfahren, die sehr hohe erreichte Energieeinsparung, die im Neubau heutzutage technisch möglich und umsetzbar ist.

Der Vergleich der Bilanzergebnisse zwischen Passivhaus mit Energiegewinn (PH+E) (vgl. Tabelle 15, linke Spalte) und dem Effizienzhaus Plus des BMVBS (2. Spalte von links) zeigt die zuvor in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Unterschiede in den Randbedingungen der Bilanzierung. Zuerst einmal sind die Ergebnisse schwierig vergleichbar aufgrund der unterschiedlichen angesetzten Flächen, der Nutzfläche A_N (1458,4 m²) und der Energiebezugsfläche EBF (1219,4 m²). Der große Unterschied des Heizwärmebedarfs zwischen 15,21 kWh/(m²_{EBFa}) des Passivhauses mit Energiegewinn und 9,23 kWh/(m²_{ANa}) des Effizienzhauses Plus ergibt sich zusätzlich zu den unterschiedlich groß angesetzten Bezugsflächen aufgrund des Ansatzes von deutlich höheren internen Wärmequellen im Effizienzhaus Plus (vgl. Tabelle 4). Der Nutzenergiebedarf

Warmwasser ist nach Berücksichtigung der Bezugsfläche beim PH+E leicht höher. Dies ist bedingt durch die Berücksichtigung der recht hohen Belegungsdichte im PHPP von 39 Personen in der Cordierstraße 4, während beim Effizienzhaus Plus eine Pauschale für Warmwasser unabhängig von der Belegungsdichte angesetzt wird.

Der Vergleich der Bedarfswerte für den elektrischen Energiebedarf zeigt in der Bilanz des PH+E den anhand des PHPPs bilanzierten elektrischen Energiebedarf (vgl. Kapitel 3.2). Bei der Bilanz des Effizienzhauses Plus wird der elektrische Hilfsenergiebedarf nach EnEV bilanziert und der Haushaltsstrombedarf mit einer Pauschale von $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{beheizter Wohnfläche}}\cdot\text{a})$ angesetzt.

Der Endenergiebedarf ergibt sich schließlich nach Berücksichtigung der Verluste der Verteilung von Heizung und Warmwasser und der Einbeziehung der Erträge aus der solarthermischen Anlage. Hier zeigt sich in dem geringeren Energiekennwert des PH+E für Warmwasser von $6,35 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \cdot \text{a})$ der Effekt der eingesetzten Effizienztechnologien zur Verringerung der Verteilverluste (vgl. Kapitel 3.1.2). Diese Technologien konnten in der Bilanz nach EnEV nicht adäquat hinterlegt werden.

Tabelle 15: Ergebnisse der Energiebilanzen der verschiedenen Bilanzierungstools

		PH + E	EffizienzhausPlus BMVBS	EnEV 2009/DIN V 18599	Referenzgebäude EnEV
spez. Transmissionswärmeverlust	W/(m ² K)		0,199	0,199	0,5
Bezugsfläche		EBF	A _N	A _N	A _N
Fläche	m ²	1219,43	1458,40	1458,40	1458,40
Energiebedarf					
Nutzenergiebedarf Heizung/Heizwärmebedarf	kWh/(m ² a)	15,21	9,23	9,23	47,94
Nutzenergiebedarf Warmwasser	kWh/(m ² a)	16,61	12,84	12,84	12,84
elektrischer Energiebedarf Hilfsenergie	kWh/(m ² a)	6,93	6,17	6,17	2,83
elektrischer Energiebedarf Beleuchtung & Haushalt	kWh/(m ² a)	14,43	16,05	0,00	0,00
Endenergiebedarf (ohne Verrechnung Gutschrift oder EnEV §5)					
Heizung	kWh/(m ² a)	16,10	12,53	12,53	66,74
Warmwasser	kWh/(m ² a)	6,35	8,58	8,58	23,30
Bilanzkennwerte					
elektrische Energieerzeugung	kWh/(m ² a)	41,76	26,69	5,08	0,00
elektrischer Energiebedarf nach Erzeugung	kWh/(m ² a)	-20,40	-4,48		
Endenergiebedarf	kWh/(m²a)	9,95	-4,48	16,03	90,03
Primärenergiebedarf	kWh/(m²a)	-22,43	-15,33	19,27	97,85

*negative Ergebniswerte zeigen den Energieüberschuss an

Auch die Bilanzkennwerte zur elektrischen Energieerzeugung unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Bilanzverfahren wesentlich aufgrund der Bilanzierung des BHKWs. Für die Energiebilanz des Effizienzhauses Plus wurde hier die DIN V 18599 Teil 9 angewendet, wodurch die Stromproduktion des dezentralen BHKWs unter Berücksichtigung der Primärenergiefaktoren als Abzug vom Endenergiebedarf des Wärmeerzeugers in die Bilanz einfließt. Auf diese Weise wird es trotz Brennstoffeinsatz möglich, in der Endenergiebi-

lanz einen Energieüberschuss zu erreichen. Bei der Bilanzierung nach PHPP in Verbindung mit Primärenergiekennwerten nach GEMIS, wie sie für die Untersuchungen in diesem Projekt verwendet werden, ist dies nicht möglich. Aufgrund der unterschiedlichen Bilanzierung des BHKWs sind die Bilanzkennwerte elektrische Energieerzeugung, elektrischer Energiebedarf nach Erzeugung und Endenergiebedarf zwischen den dargestellten Varianten PH+E und Effizienzhaus Plus daher nicht vergleichbar. Beide Bilanzierungsarten haben ihre Vor- und Nachteile, die jedoch an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden sollen. Dargestellt werden soll jedoch, wodurch die entsprechenden Unterschiede in den Kennzahlen weiter zustande kommen.

Die elektrische Energieerzeugung stellt für das PH+E die anhand von Simulationsprogrammen ermittelte elektrische Energieerzeugung durch die Photovoltaik-Anlage ($33,87 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFa}})$) und das BHKW ($7,89 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFa}})$) dar, in Summe $41,76 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFa}})$. Die elektrische Energieerzeugung aus der Bilanz des Effizienzhauses Plus stellt dagegen die im Rahmen der EnEV-Bilanzierung gemäß DIN EN 15316-4-6 berechnete Stromerzeugung nur aus Photovoltaik dar. Weiterhin fällt der Wert der elektrischen Energieerzeugung mit $26,69 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{ANa}})$ leicht geringer aus als die Simulationsergebnisse der Photovoltaikanlage, da diese anhand der vorgegebenen Randbedingungen der DIN EN 15316-4-6 nicht genau abbildet werden kann. Entsprechend geringer fällt auch der Überschuss (elektrische Energiebedarf nach Erzeugung) in der Bilanz des Effizienzhauses Plus aus, da hier der geringere Photovoltaikertrag berücksichtigt ist und keine Stromerzeugung durch das BHKW einfließt. Aufgrund der zuvor beschriebenen Bilanzierung des BHKWs fließt dieses beim Effizienzhaus Plus nicht in den Endenergiebedarf mit ein, wodurch dieser in Höhe des elektrischen Energiebedarfs nach Erzeugung ausfällt. Bei der Bilanz des PH+E wird der Endenergiebedarf des Energieträgers Biomethan zuzüglich des elektrischen Energiebedarfs für Haushalts- und Hilfsstrom reduziert um die Stromerzeugung ausgewiesen, so dass hier ein Endenergiebedarf von $9,95 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBFa}})$ bestehen bleibt.

Der Primärenergiebedarf fällt nach Berücksichtigung der unterschiedlichen Bezugsflächen zwischen den verschiedenen Bilanzierungsverfahren gar nicht so unterschiedlich aus (Absolutwerte PH+E 27.350 kWh/a ; Effizienzhaus Plus 22.356 kWh/a). Er kommt aber auf sehr unterschiedlichem Weg in ähnlicher Größenordnung zustande: Während bei der Primärenergiebilanz des PH+E aufgrund des hohen elektrischen Energieüberschusses ein hoher Primärenergieüberschuss erreicht wird, wird der Primärenergieüberschuss des Effizienzhauses Plus durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Primärenergiefaktoren für Einspeisung und Bezug sowie die Einbeziehung des Photovoltaikstromes ohne eigenen Primärenergiefaktor erreicht.

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

Nach beiden Bilanzierungsverfahren erreicht das PH+E einen Primärenergieüberschuss in der Jahresbilanz. Aufgrund der oben beschriebenen Unterschiede in den Bilanzierungsverfahren dürfen die Kennwerte der unterschiedlichen Verfahren jedoch nicht miteinander verglichen oder vermischt werden. Außerdem ist zu beachten, dass die Angabe von Kennwerten nur dann sinnvoll ist, wenn das zugrundeliegende Berechnungsverfahren und die jeweiligen Bezugsflächen angegeben werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Passivhaus mit Energiegewinn in der Cordierstraße 4 wird von der ABG Frankfurt Holding als Ersatzneubau eines Gebäudes aus den 1920er Jahren errichtet. Das Gebäude soll einem ganzen Bündel an Anforderungen gerecht werden: Dazu gehört im Wesentlichen die Erreichung des Zieles des Energieüberschusses bei einem Mehrfamilienhaus, das im Vergleich zu Einfamilienhäusern weniger (Dach-)Fläche pro m² Wohnfläche für die solare Energieerzeugung zur Verfügung hat. Das Gebäude muss in das bestehende Quartier eingegliedert werden, mit seiner für die solare Energieerzeugung eher ungünstigen Ost/West-Ausrichtung und entsprechenden gestalterischen Randbedingungen. Schließlich soll es den Anforderungen an die Vermietung gerecht werden und die Kosten müssen in einem für die Wohnungsbaugesellschaft tragbaren Rahmen bleiben.

Diese Anforderungen konnten im Projektverlauf für das Gebäude in der Cordierstraße 4 erreicht werden. Hierzu wurde ein ganzheitliches Effizienzkonzept entwickelt, das den Energiebedarf des Gebäudes in der Cordierstraße 4 deutlich reduziert. Die Eckpunkte dieses Effizienzkonzeptes lauten:

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

Der durch die sehr hohe Energieeffizienz des Gebäudes reduzierte Energiebedarf wird schließlich mit regenerativen Energien gedeckt. Hierzu wird eine solarthermische Anlage mit hoher Effizienz eingesetzt, ein Biomethan-betriebenes Blockheizkraftwerk mit Brennwertnutzung deckt den kompletten Restwärmebedarf. Dies wird möglich durch den Einsatz von zwei sehr großen Pufferspeichern, die eine entsprechende Leistungsreserve für Lastspitzen bereitstellen. Die Kombination von solarthermischer Anlage und BHKW hat zum Ziel, den Einsatz des regenerativen Brennstoffs Biomethan möglichst gering zu halten und gleichzeitig das Biomethan in dem wärmegeführten BHKW sehr effizient zu nutzen.

Als Nebenprodukt der Wärmeerzeugung wird elektrische Energie produziert. Aufgrund der Kombination von solarthermischer Anlage und wärmegeführtem BHKW zur Wärmeerzeugung wird nur in Zeiten ungenügender solarer Einstrahlung vom BHKW Wärme und elektrische Energie produziert. Dies führt dazu, dass bei der Kombination mit der Photovoltaikanlage, die überwiegend in strahlungsreichen Zeiten Strom erzeugt, sich beide Stromerzeuger optimal ergänzen. Dadurch kann ein deutlich höherer zeitlicher Ausgleich von elektrischer Energieerzeugung und Energiebedarf – und damit geringere Auswirkungen auf das elektrische Netz – erreicht werden als bei einem „nur-Strom-Konzept“ auf Basis von Photovoltaikanlage und Wärmepumpe. Das Gebäude in der Cordierstraße 4 produziert auf Monatsbasis so viel elektrische Energie wie es verbraucht. Um den Ausgleich zwischen Bedarf und Erzeugung weiter zu erhöhen, ist ein elektrischer Energiespeicher geplant, durch den ein Ausgleich zwischen Bedarf und Erzeugung auf Stundenbasis zu über 80 % erreicht werden kann.

Neben der ausgeglichenen Monatsbilanz wird in der Jahresbilanz dann ein deutlicher Überschuss an elektrischer Energieerzeugung erreicht. Dieser wird hauptsächlich in den Sommermonaten durch die Photovoltaikanlage produziert. Diese ist aufgrund des Ziels eines möglichst sparsamen Einsatzes regenerativer Brennstoffe auch bei dem Gebäude in der Cordierstraße 4 entscheidender Faktor für eine positive Energiebilanz. Es wurden daher gleich mehrere Photovoltaikanlagen geplant: auf einem Teil des Daches des Wohngebäu-

des, auf dem auch die solarthermische Anlage installiert ist, auf dem Carport und an der Südfassade. Entscheidend für eine hohe solare Energieerzeugung (Solarthermie und Photovoltaik) ist eine optimale Nutzung der für die solare Energieerzeugung geeigneten Flächen. Die Anlagen in der Cordierstraße 4 wurden daher an folgenden Stellen optimiert: der Ausrichtung und Neigung der Photovoltaikmodule und solarthermischen Kollektoren, der Aufteilung der Dachfläche zwischen Solarthermie und Photovoltaik und der Wahl geeigneter, effizienter Komponenten. Ergebnis ist, dass ca. 1/3 der Dachfläche des Wohngebäudes für die solarthermische Energieerzeugung genutzt wird und 2/3 der Dachfläche für Stromerzeugung durch Photovoltaik. Während die solarthermische Anlage nach Süden ausgerichtet ist, ist die Photovoltaik auf dem Flachdach des Wohngebäudes zur besseren Flächenausnutzung Ost-/West orientiert, bei sehr geringer Neigung von 15°. Das Carport-Dach ist komplett mit Photovoltaik belegt und wurde um 10° nach Süden geneigt ausgerichtet, die Module an der Fassade sind vorgehängt.

Durch das beschriebene Effizienzkonzept in Kombination mit der Anlagentechnik ergeben sich für das Passivhaus mit Energiegewinn Cordierstraße 4 sehr gute Bilanzkennwerte. Es werden 20,4 kWh/(m²a) elektrische Energie mehr erzeugt als das Gebäude verbraucht. Dieser Stromüberschuss wird in das elektrische Netz eingespeist und dem Gebäude primärenergetisch gutgeschrieben. Es wird ein Primärenergiekennwert von -22,43 kWh/(m²a) erreicht. In der Bilanz der Treibhausgasemissionen verbleibt ein geringer Ausstoß von 1,75 kg/(m²a) CO₂-Äquivalent. Es wird Biomasse im Umfang von 30,34 kWh/(m²a) für die Wärme- und Stromerzeugung mit dem BHKW in Anspruch genommen und somit deutlich weniger, als das maximale Biomassepotenzial von 35 kWh/(m²a).

Die Umsetzung des Bauvorhabens in der Cordierstraße 4 ist zum Zeitpunkt dieser Berichterstellung nahezu abgeschlossen. Die Realisierung des zur Vermietung vorgesehenen Mehrfamilienhauses als Passivhaus mit Energiegewinn durch die Wohnungsbaugesellschaft ABG FRANKFURT HOLDING zeigt die Machbarkeit des im Planungsteam entwickelten Konzeptes. Wesentlicher Anteil an der erfolgreichen Umsetzung in die Praxis kommt den erfahrenen Planern vom Büro faktor10 zu, die über die üblichen Anforderungen an Wohngebäude hinaus gehenden Maßnahmen zur Erreichung des Energiegewinns effizient in den Planungs- und Umsetzungsprozess integrieren konnten.

Im nächsten Schritt sollte das Ziel des Energieüberschusses über die ersten „Leuchtturmprojekte“ hinaus nun in der Breite weiter umgesetzt werden. Das in diesem Bericht dargestellte Konzept kann auf viele ähnliche Gebäude zur Erreichung eines Energiegewinns übertragen werden. Aus den Ergebnissen dieses Projekts wird vom IWU ein übergreifendes Konzept für „Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E)“ weiterentwickelt, das in einem zusätzlichen Bericht dokumentiert wird.

Literaturverzeichnis

- [Biogas 2008] Autorenkollektiv: Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland; Verbundprojekt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Endbericht, 2008
- [BioSt-NachV 2009] Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von flüssiger Biomasse zur Stromerzeugung (Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung – BioSt-NachV), Fassung vom 23.07.2009
- [BMVBS 2011] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011): Wege zum Effizienzhaus, August 2011
- [BMVBS 2013] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013): Fachveranstaltung "Effizienzhaus Plus – Konzepte und Betriebserfahrungen" am 14. Juni 2013 in Hamburg
http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/IR/EHP/veranstaltung_02.html?nn=114548; 23.09.2013
- [BMW i 2013] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013): Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung, Tabellenblatt 6a, letzte Änderung 21.5.2013,
<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html>, BMW i, 18.6.2013
- [BMW i 2013] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2012): Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung, Tabellenblatt 6a, letzte Änderung 21.5.2013,
<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html>
- [Bost et al. 2011] Bost, Mark; Hirschl, Bernd; Aretz, Astrid: Effekte von Eigenverbrauch und Netzparität bei der Photovoltaik; Studie des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung im Auftrag von Greenpeace Energy eG; 2011;
http://www.ioew.de/uploads/tx_ukioewdb/Effekte_der_Netzparit%C3%A4t_-_Langfassung.pdf; 29.6.2012
- [Bühler 2013] Auskünfte per Telefon und E-Mail von Herrn Bühler, Ritter XL Solar GmbH, zur Einbindung und Regelung der solarthermischen Anlage von Paradigma, 27.05.2013

- [Clausnitzer, Hoffmann 2009] Clausnitzer, Klaus-Dieter; Hoffmann, Nadine (2009): Allgemeinstrom in Wohngebäuden – Dämpfung der Wohn-Nebenkosten durch Innovationen zur Reduktion des Allgemeinstromverbrauchs, Bremer Energie Institut, 2009
<http://www.bremer-energie-institut.de/download/publications/Allgemeinstrom-Bericht.pdf>; 06.05.2011
- [Diefenbach 2002] Diefenbach, Nikolaus (2002): Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen,
http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/bewertungbiomasse.pdf; 27.04.2011
- [Fisch et al. 2012] Fisch, Norbert; Wilken, Thomas; Stähr, Christina (2012): EnergiePLUS – Gebäude und Quartiere als erneuerbare Energiequellen; Leonberg; 2012
- [GEMIS 2013] GEMIS –Globales Emissions-Modell integrierter Systeme, Version 4.8.1
<http://www.iinas.org/gemis-de.html>
- [Großklos 2011] Großklos, Marc: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128, Teilbericht: Dokumentation der Bauphase; Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, 2011
- [Großklos et al. 2010] Großklos, Marc; Koch, Thilo, Diefenbach, Nikolaus: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt a. M., Teilbericht Planungsphase und Null-Emissions-Konzept, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2010
- [Großklos et al 2013] Großklos, Marc; Schaede, Margrit; Hacke, Ulrike: Ergebnisse der Modernisierung von sieben Mehrfamilienhäusern auf Passivhaus-Standard; in: 17. Internationale Passivhaustagung, Tagungsband zur Konferenz in Frankfurt, April 2013, S. 207-212
- [Großklos, Frank 2013] Großklos, Marc; Frank, Milena: Monatlicher Verlauf des kumulierten Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Strommix; in Energiewirtschaftliche Tagesfragen 63. Jg. (2013) Heft 9; September 2013; S. 32-35
- [Großklos, Schaede 2013] Großklos, Marc; Schaede, Margrit: Practical experiences with refurbishing seven apartment buildings to zero-emission level; in: Book of Full Papers – sb 13 Munich, Implementing Sustainability – Barriers and Chances, Tagungsband zur Konferenz in München, April 2013, S. 520 – 526
- [Großklos 2013] Großklos, Marc: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128, Endbericht: Ergebnisse der messtechnischen Erfolgskontrolle; Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, 2011
- [KfW 2013] KfW-Programm Erneuerbare Energien „Speicher“, Programmnummer 275,

KfW-Merkblatt 6000002700, Stand 5/2013

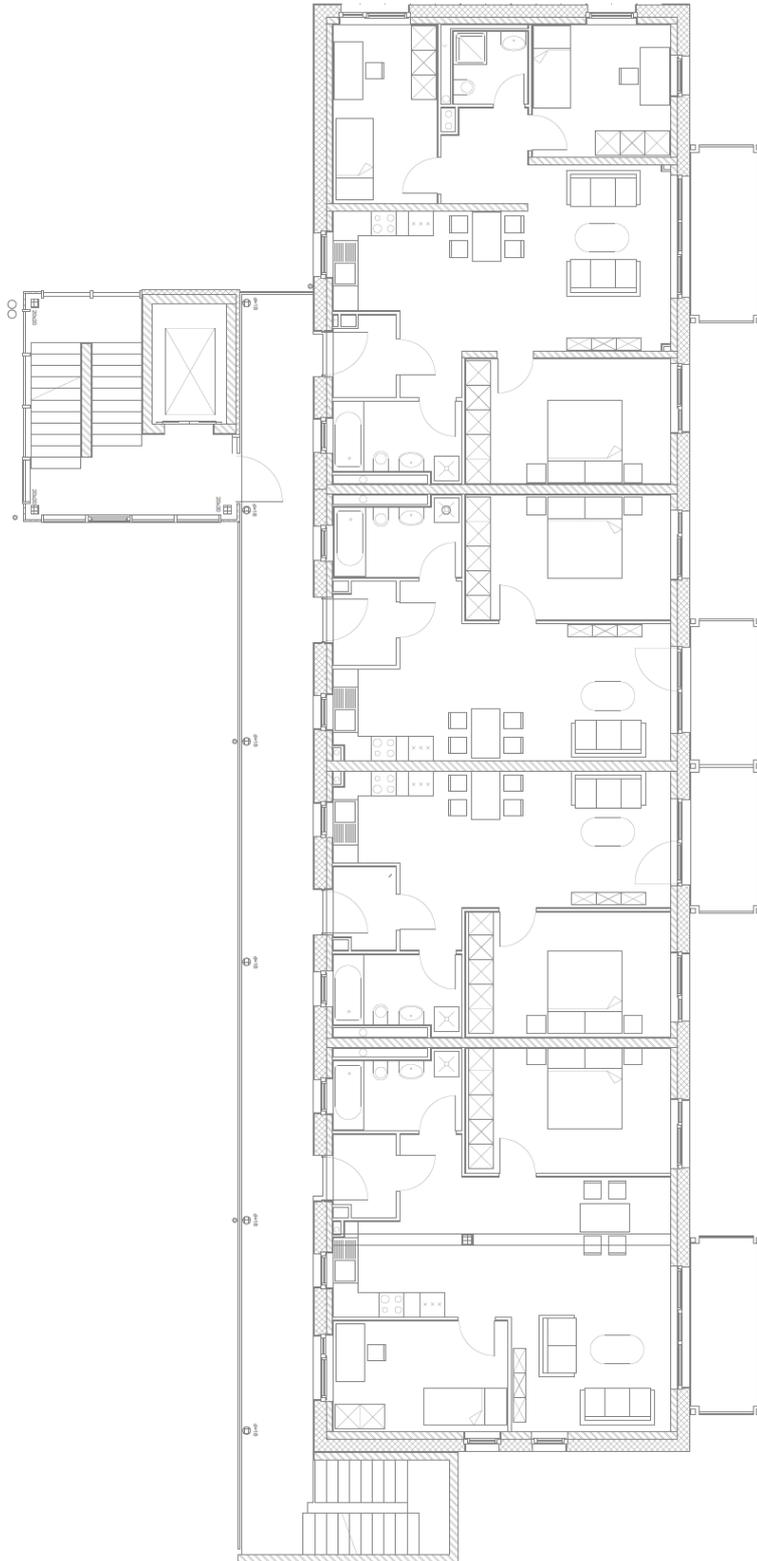
- [Loose 2012] Loose, Anja (2012): Kombination Solarthermie und Wärmepumpe; Vortragsunterlagen auf dem GREES Kolloquium Effiziente Energienutzung, Stuttgart, 6.6.2012; http://www.grees.uni-stuttgart.de/kolloquium/Kolloquium_2012/20120606_Loose.pdf
- [Lücking, Hauser 2012] Lücking, Rolf-Michael; Hauser, Gerd (2012): Plusenergiehäuser – technische und ökonomische Grundlagen; Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2012
- [Mattli et al 2010] Mattli, Serge; Menti, Urs-Peter; Plüss, Iwan; Thaler, Eveline (2010): Wärmeverlust von Funktionsöffnungen – Vorstudie zur Quantifizierung des Wärmeverlustes von Gebäuden über Funktionsöffnungen infolge Einrohrzirkulation; Bundesamt für Energie BFE, Schweiz, 2010
- [Miara et al. 2011] Miara, Marek; Günther, Danny; Kramer, Thomas et al. (2011): Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb; Fraunhofer ISE; Freiburg; 2011
http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/download/wp_effizienz_endbericht_langfassung.pdf; 30.10.2012
- [Öko 2008a] Hennenberg, K.; Fritsche, U.: Bioenergie und Biodiversität: Konflikte und Herausforderungen; Vortragfolien für 08.04.2008
- [Öko 2011a] Fritsche, U.: Indirekte Landnutzungsänderungen (ILUC) durch Biokraftstoffe – Effekte und deren Bewertung -; Beitrag zur Ringvorlesung „Alternative Kraftstoffe“ an der TU Hamburg-Harburg, 13.05.2011
- [Öko 2012a] Mitteilung von Lothar Rausch, Öko-Institut, Darmstadt am 13.01.2012 per Mail
- [PHI 2013] Passivhaus Institut (2013): EnerPHit und EnerPHit+i – Zertifizierungskriterien für die Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten;
http://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_enerphit_de.pdf; 02.10.2013
- [PHPP 2012] Passivhaus Institut (2012): Passivhaus Projektierungs-Paket Version 7.1
- [Quaschnig 2011] <http://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.php> vom 18.10.2013
- [Qurck 2013] Qurck, Lukas: Elektrische Energiespeicher in Wohngebäuden; Vortragsunterlagen zum Arbeitskreis Energieberatung des IWU am 07.03.2013, <http://www.iwu.de/downloads/fachtagungen/nullenergie/>
- [Rasch 2012] Persönliche Auskunft von Herrn Rasch, faktor10, zum Projekt „Warmmie-

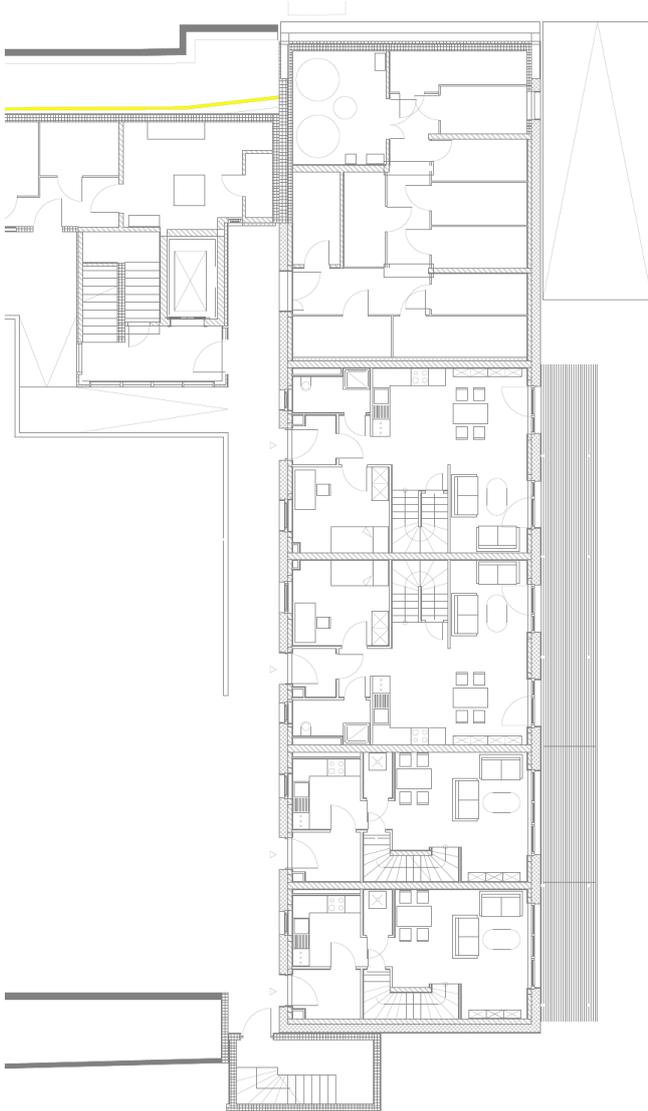
tenmodell“, 14.10.2013

- [Senertec 2012] Technisches Datenblatt Dachs:
<http://www.senertec.de>; 07.08.2012
- [Stadt Frankfurt 2006] Stadt Frankfurt am Main Dezernat Umwelt und Gesundheit Energiereferat
 2006: Beschlüsse der Stadtverordnetenversammlung der Stadt Frankfurt
 am Main zum Klimaschutz ab dem Jahr 2006
[https://www.frankfurt.de/sixcms/media.php/738/Klimaschutz-
 Beschl%C3%BCse-2009-08_bf.pdf](https://www.frankfurt.de/sixcms/media.php/738/Klimaschutz-Beschl%C3%BCse-2009-08_bf.pdf); 24.6.2013
- [Solaranlagen-Portal 2013] Internetseite www.solaranlagen-portal.de, abgerufen im Oktober 2013
- [TrinkwV 2001] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch
 (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001): §14
http://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2001/index.html; 11.10.2013
- [VDI 6002-1] Verein Deutscher Ingenieure, Richtlinie VDI 6002-1 (2004): Solare Trink-
 wassererwärmung – Allgemeine Grundlagen, Systemtechnik und Anwen-
 dung im Wohnungsbau; Düsseldorf 2004
- [Voss et al 2011] Voss, Karsten; Musall, Eike; Lichtmeß, Markus (2011): From low-energy to
 net Zero-Energy Buildings: Status and Perspectives, Journal of Green Build-
 ing, Vol.6, No. 1, 2011; [http://www.iea-
 shc.org/publications/downloads/a06_Voss.pdf](http://www.iea-shc.org/publications/downloads/a06_Voss.pdf), 22.6.2012
- [WagnerSolar 2011] Datenblatt EURO L20 MQ AR – Flachkollektor
[http://www.wagner-solar.com/waerme/produkte/solarkollektoren/solar
 kollektor-euro-l20-mq-ar.html](http://www.wagner-solar.com/waerme/produkte/solarkollektoren/solar-kollektor-euro-l20-mq-ar.html); 20.09.2011

Anhang A Grundrisse und Schnitte

Grundriss 2.-4. OG (ohne Bemaßungen)



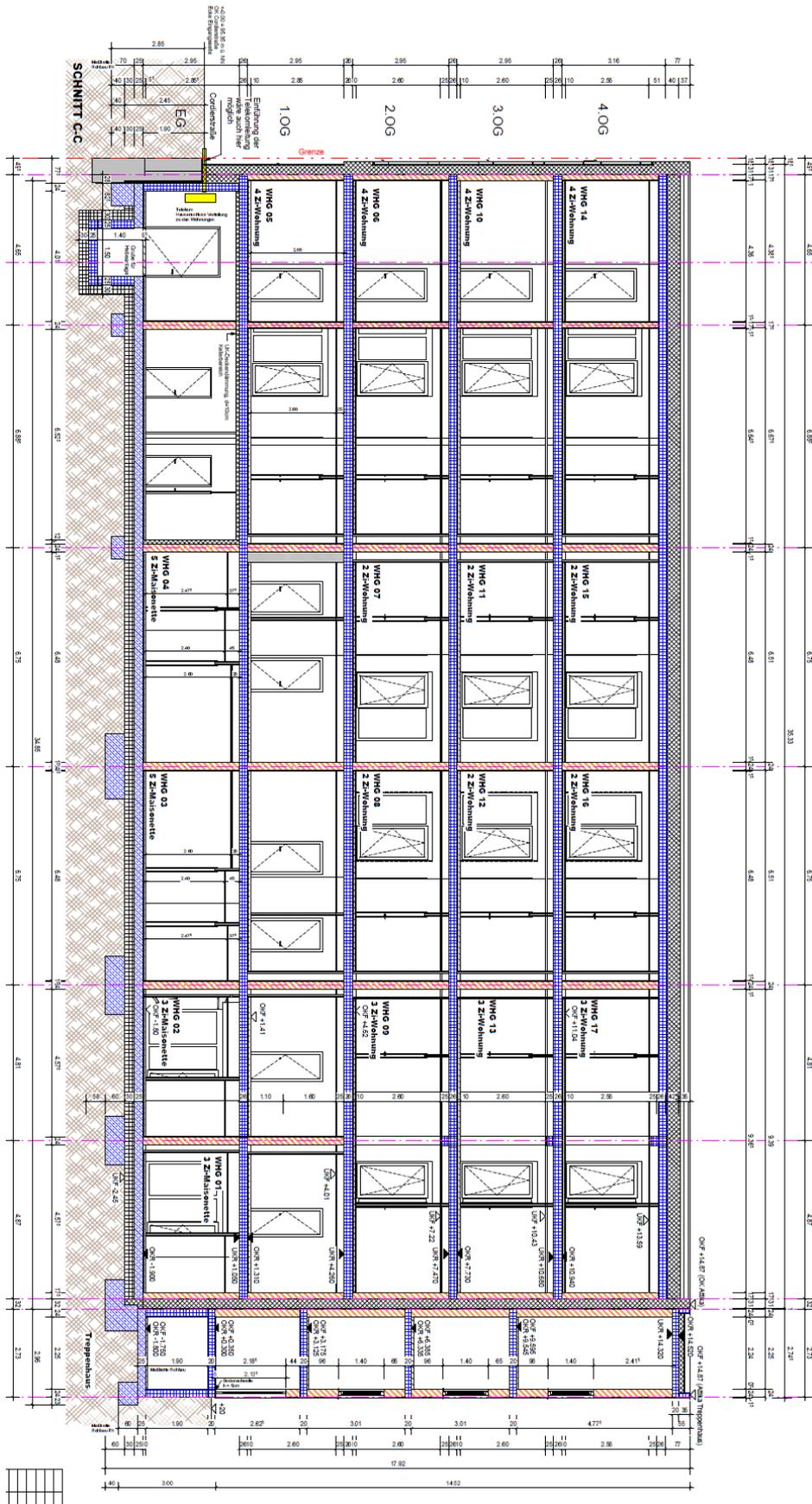


Grundriss EG (ohne Bemaßungen)



Grundriss 1. OG (ohne Bemaßungen)

Längsschnitt durch das Gebäude



Schnitt durch Gebäude und Treppenhaus

